



**Tielaitos**

# **Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen**

Esitutkimus



**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**34/1993**

Oulu 1993

**Geokeskus**  
Oulun kehitysyksikkö

Tielaitoksen selvityksiä  
34/1993

**Kalliomurskeiden tiivistyminen  
ja hienoneminen**

Esitutkimus

**Tielaitos**  
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Oulu 1993



ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-7663-1  
TIEL 3200159  
Painatuskeskus Oy  
Helsinki 1993

Julkaisua myy:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotemyynti  
Telefax (90) 1487 2652

**Tielaitos**

Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö  
Kansankatu 47  
PL 261  
90101 OULU  
Puh. (981) 310 9383

Asiasanat kalliomurske, tärytiivistäminen, hienoneminen

## TIIVISTELMÄ

Esitutkimuksen tavoitteena oli selvittää menetelmät, joilla voidaan määrittää tärytiivistämisen vaikutus kantavan kerroksen kalliomurskeiden tiivistymiseen ja hienonemiseen. Lisäksi haluttiin myös selvittää mahdollisuudet tehdä tiivistämiskokeita laboratorio-olosuhteissa.

Tutkimus jakaantuu mittakaavaltaan kahdenlaisiin jyräyskokeisiin ja laboratoriolaitteilla (ICT ja Proctor) tehtäviin tiivistyskokeisiin. Kokeissa seurataan tiiviyn kehitystä ja rakeisuuden muuttumista eri kalliomurskeilla. Tutkimukseen valituille kalliomurskeille (4 eri materiaalia) tehtiin tavanomaisten lujuustestien lisäksi minerologiset tutkimukset.

Tiivistymistä mitattiin Troxler-laitteella sekä pinta- että suoramittauksena eri syvyyksiltä. Suoramittauksia varten kehitettiin erityinen mittausputki, joka osoittautui käyttökelpoiseksi. Hienonemista tutkittiin materiaalinäytteistä, joita otettiin kerroksittain.

Kirjallisuusosassa, joka palvelee jatkotutkimusta, kuvataan täry- ja oskilloivan jyrän ja niihin liitettävien tiiviyksmittarien toimintaperiaatteita.

Tutkimus osoitti, että tiheys kasvaa säännöllisesti jyräyskertojen funktiona. Kerroksen pintaosa tiivistyy nopeammin ja enemmän kuin alemmat osat. Kokeessa käytetyt materiaalit eivät hienontuneet kovin merkittävästi. Materiaali hienonee eniten tiivistämisen alkuvaiheessa, mikä todettiin sekä jyräyskokeissa että laboratoriotesteissä. Hienoainekselle tehdyt määritykset osoittivat, että sen ominaisuudet eivät muutu merkittävästi, joten hienonemista voidaan tutkia pelkkien seulontatulosten avulla (pesuseulonta).

Kevyemmän kaksivalssisen täryjyrän aikaansaama hienoneminen ja tiivistyminen olivat verrannollisia raskaamman yksivalssisen täryjyrän vastaaviin arvoihin. Sen sijaan laboratoriotestit ja kenttämittaukset eivät suoraan vastaa toisiaan. Ero johtunee laboratoriotestilaitteissa olevasta joustamattomasta alustasta.

Jyräyskertojen lukumäärä kannattaisi määrittää ennakkoon menetelmällä, jossa ennustetaan tarvittava jyräyskertamäärä suoraan todellisesta rakenteesta. Menetelmä on nopea ja luotettava, koska alusrakenne, tiivistettävä kerros ja jyrä ovat oikeita. Tiheys mitataan radiometrisellä laitteella suoramittauksena aina samasta kohdasta kerrosta häiritsemättä. Tämä on mahdollista kun mittaukset tehdään ennen jyräystä asennettavista mittausputkista. Menetelmää voidaan periaatteessa käyttää myös tiivistystyön seurantaan. Tällöin on käytettävä samaa laitetta kuin jyräyskertoja määritettäessä, jolloin ei tarvita laitteiden välistä kalibrointia.

## ALKUSANAT

*Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa* -projekti alkoi kirjallisuuteen ja käyttökokemuksiin perustuvalla esiselvityksellä vuonna 1991 (Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 26/1992). Tiivistämisen ja hienonemisen osaprojektista on nyt valmiina käsillä oleva esitutkimus. Projektikokonaisuuteen liittyy läheisesti TTKK:ssa tehtävä tutkimus *Materiaalien dynaamiset ominaisuudet*, osaprojekti 1.

Tutkimusraportin laativat T. Ryytänen, H. Kotimäki ja J. Belt. Kalliomurskeiden tiivistäminen ja hienoneminen, esitutkimus -työryhmään kuuluivat:

Heikki Suni (pj), TIEL/Oulun kehitysyksikkö  
Tuomo Kallionpää, TIEL/Geokeskus  
Kari Lappalainen, TIEL/Geokeskus  
Pauli Pouttu, TIEL/Kehittämiskeskus  
Jouko Belt, Oulun yliopisto  
Teuvo Ryytänen, Oulun yliopisto  
Harri Kotimäki, Oulun yliopisto



## SISÄLTÖ

JOHDANTO	7
1. TIIVISTYSKOKEET KEMPELEESSÄ	8
1.1. Koealueen kuvaus	8
1.2. Materiaalit	9
1.3. Jyrät	13
1.4. Kokeiden suoritus	15
1.4.1. Tiheyden mittaaminen	15
1.4.2. Laboratoriokoe	16
1.4.3. Kenttäkoe	18
1.5. Tiivistyminen jyräyskokeissa	21
1.5.1. Troxler-laitteella määritettyjen tiheyksien ja kosteuksien kalibrointi	21
1.5.2. Tiivistymisen arviointi ja laskentamalli	25
1.5.3. Tiivistymistulokset	27
1.6. Hienoneminen jyräyskokeissa	29
1.6.1. Hienonemistulokset	30
1.6.2. Areometrianalyysit	33
1.6.3. Veden adsorptio	35
1.6.4. Kapillaarisuus	36
2. LABORATORIOTIIVISTYS	36
2.1. Proctor-kokeet	36
2.2. IC-laitekokeet	40
2.2.1. Yleistä	40
2.2.2. Tiivistyminen	40
2.2.3. Hienoneminen	43
3. YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU	45
3.1. Päätulokset	45
3.2. Tiivistyminen	45
3.3. Hienoneminen	48
4. TIIVISTÄMISTUTKIMUKSEN JATKAMINEN	50
4.1. Yleistä	50
4.2. Jatkotutkimukset	50
4.2.1. Perusteet tutkimuksen jatkamiselle	50
4.2.2. Atk-Sovellutus	51
4.2.3. Oskilloivan ja perinteisen täryjyrän vertailu	51
4.2.4. Kenttäsovellutus	52
4.2.5. Laboratoriokokeet	52
4.2.6. Urituslaitekokeet	53
4.3. Täryjyrä ja oskilloiva jyrä	54
4.3.1. Täryjyrä	54
4.3.2. Oskilloiva jyrä	57
4.4. Jyriin liitettävät tiivistysmittarit	59
4.4.1. Yleistä	59
4.4.2. Mittausperiaate	59
4.4.3. Tavaramerkkejä	63
4.5. Mittausputki	66
KIRJALLISUUSLUETTELO	68
LIITELUETTELO	71

## JOHDANTO

Useilla rakentamishankkeilla ja tiivistämiskokeiluissa on todettu rakentamisen aikaista materiaalin hienonemista. Syynä on voinut olla väärä jyrätyyppi, liika jyräys, kastelu tai liikenne. Nykyisten ohjeiden mukaisesti suoritettussa soramurskeiden tiivistystyössä tiivistettävän kerroksen materiaalimuutokset ovat ilmeisesti suhteellisen vähäisiä, jos materiaali on kelvollista. Kalliomurskerakenteissa ongelmia voivat aiheuttaa rakeiden särmikkyys, mikä vaikeuttaa kerrosten tiivistämistä tai materiaalille tyypillinen raekokojakauma, esimerkiksi roikkuva rakeisuuskäyrä, mikä vaikeuttaa rakenteen kastelua optimivesipitoisuuteen.

Luotettavan kuvan saamiseksi nykyohjeiden mukaisen tiivistyksen vaikutuksista kalliomurskekerroksiin tarvittiin kontrolloiduissa olosuhteissa tehty tutkimus hienonemisesta ja tiiviyn kehittämisestä tiivistystyön aikana. Käytettävät kalliomurskeet valittiin siten, että ne ovat laadultaan selvästi toisistaan poikkeavia mutta rakeisuudeltaan ja muotoarvoiltaan samanlaisia (tyypillisiä kalliomurskeita).

Esitutkimuksen tavoitteena oli selvittää menetelmät, joilla voidaan määrittää tärytiivistämisen vaikutus kantavan kerroksen kalliomurskeiden tiivistymiseen ja hienonemiseen. Esitutkimuksella selvitettiin myös mahdollisuudet tehdä tiivistämiskokeita laboratorio-olosuhteissa. Tutkimuksen ohessa tutustuttiin myös aiheesta julkaisuun kirjallisuuteen.

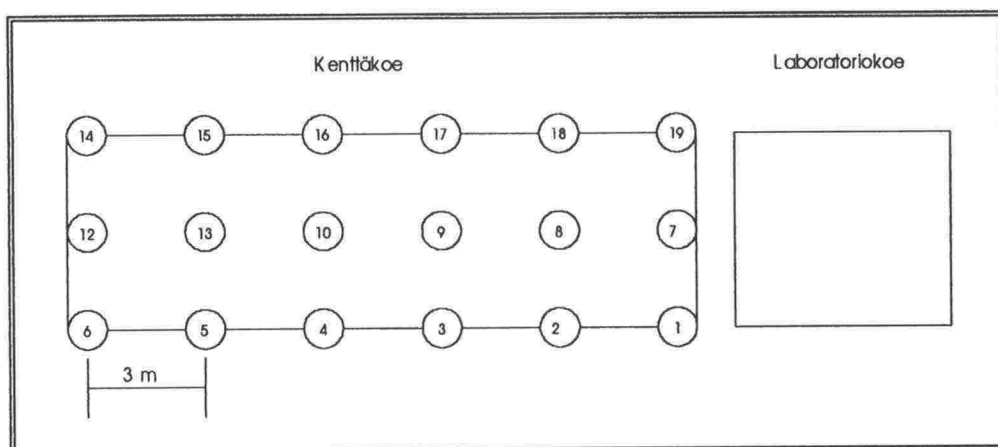
Tutkimus jakaantui mittakaavaltaan kahdenlaisiin jyräyskokeisiin ja laboratoriolaitteilla (IC ja Proctor) tehtyihin tiivistyskokeisiin. Kokeissa seurattiin tiiviyn kehittymistä ja rakeisuuden muuttumista eri kalliomurskeilla. Kirjallisuusosassa, joka palvelee jatkotutkimusta, kuvattiin täry- ja oskilloivan jyrän ja niihin liitettävien tiivistysmittarien toimintaperiaatteita.

# 1. TIIVISTYSKOKEET KEMPELEESSÄ

## 1.1. Koealueen kuvaus

Kokeet tehtiin tielaitoksen Oulun piirin keskuslaboratorion varastokentällä. Laboratoriomittakaavaisen koeruudun vieressä oli varsinaisen kenttäkokeen koealue. Pohjamaa oli hiekkaa, jonka päällä oli n. 40 cm hiekkamoreenia. Laboratoriomittakaavaisesta kokeesta käytetään lyhyden vuoksi nimitystä laboratoriokoe, vaikka se tehtiin ulkona. Koejärjysohjeen mukainen täysimittakaavainen koe on tässä kenttäkoe.

Alue mitattiin pudotuspainolaitteella 19 pisteestä (kuva 1). Pudotuspainolaitteen taipumamittaustuloksista laskettiin Phønixin kehittämällä monikerrosohjelmalla kerrosten dynaamiset E-moduulit (taulukko 1). Lasketussa kaksikerrosrakenteessa ylemmän kerroksen paksuutena käytettiin 40 cm. Koska mittaus tehtiin sorapohjalta, yksittäiset taipuma-arvot saattavat aiheuttaa suurehkoja poikkeamia E-moduuleihin. Ylemmän kerroksen E-moduulit vastaavat tyypillisesti jakavan kerroksen E-moduuleja. Kantavuus oli keskimäärin 127 MPa ja keskihajonta 19 MPa.



Kuva 1: Koealueen kantavuuden mittauspisteet

Taulukko 1: Pudotuspainolaitteella määritetyt kantavuudet ja kerrosten E-moduulit. E1 kuvaa 40 cm hiekkamoreenikerrosta ja E3 pohjamaata (hiekka)

PAALU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19
KANTAVUUS, MPa	131	99	124	159	141	105	132	112	130	140	102	135	113	136	165	141	116	109
E1, MPa	225	134	177	248	215	97	197	282	198	195	148	183	103	185	183	233	163	160
E3, MPa	63	78	88	93	84	492	83	31	79	105	69	107	682	109	254	72	83	72



## 1.2. Materiaalit

Kokeissa käytettiin kahta päämateriaalia, joista käytetään saantipaikan mukaisia nimiä: Nurmo ja Sievi (Korianmäki). Näitä materiaaleja käytettiin sellaisinaan kenttäkokeessa ja laboratoriokokeen laatikoissa 1 - 4. Paikallisia kalliomurskeita otettiin vertailuun mukaan kaksi: Jaara (Kempele, Linnakangas) ja Alakylä (Vittakangas). Koemateriaaleille määritetyt kiviainesominaisuudet on kerätty *taulukoon 2*. Päämateriaaleista valmistettiin edelleen seulomalla suhteistuneet murskeet (laatikot 7 ja 8 laboratoriokokeessa). Laboratoriokokeessa materiaalit oli numeroitu:

1. Nurmo
2. Sievi
3. Sievi (rinnakkaiskoe)
4. Nurmo (rinnakkaiskoe)
5. Jaara
6. Alakylä
7. Nurmo (suhteutettu)
8. Sievi (suhteutettu)

ja kenttäkokeessa:

1. Sievi
2. Nurmo

*Taulukko 2: Kokeissa käytettyjen kalliomurskeiden kiviainesominaisuudet*

	Sievi	Nurmo	Alakylä	Jaara
kiviaineksen kiintotiheys	2804	2748	2737	2636
Los Angelesluku	15.6	76.1	21.6	32.1
parannettu haurausarvo	12.5	48.8	18.6	26.7
hioutuvuusluku	1.57	6.10	3.67	2.39
muotoarvo 8-12 mm	2.545 / 1.623	2.334 / 1.610	2.694 / 1.808	2.520 / 1.589
muotoarvo 12-16 mm	2.514 / 1.643	2.487 / 1.753	2.487 / 1.625	2.509 / 1.729
hehkutushäviö %	1.51	0.80	1.24	0.76
pistekuormitusindeksi	16.92 (8.1-22.4)	7.3 (2.9-9.6)	7.41 (6.4-9.0)	11.59 (7.9-12.6)

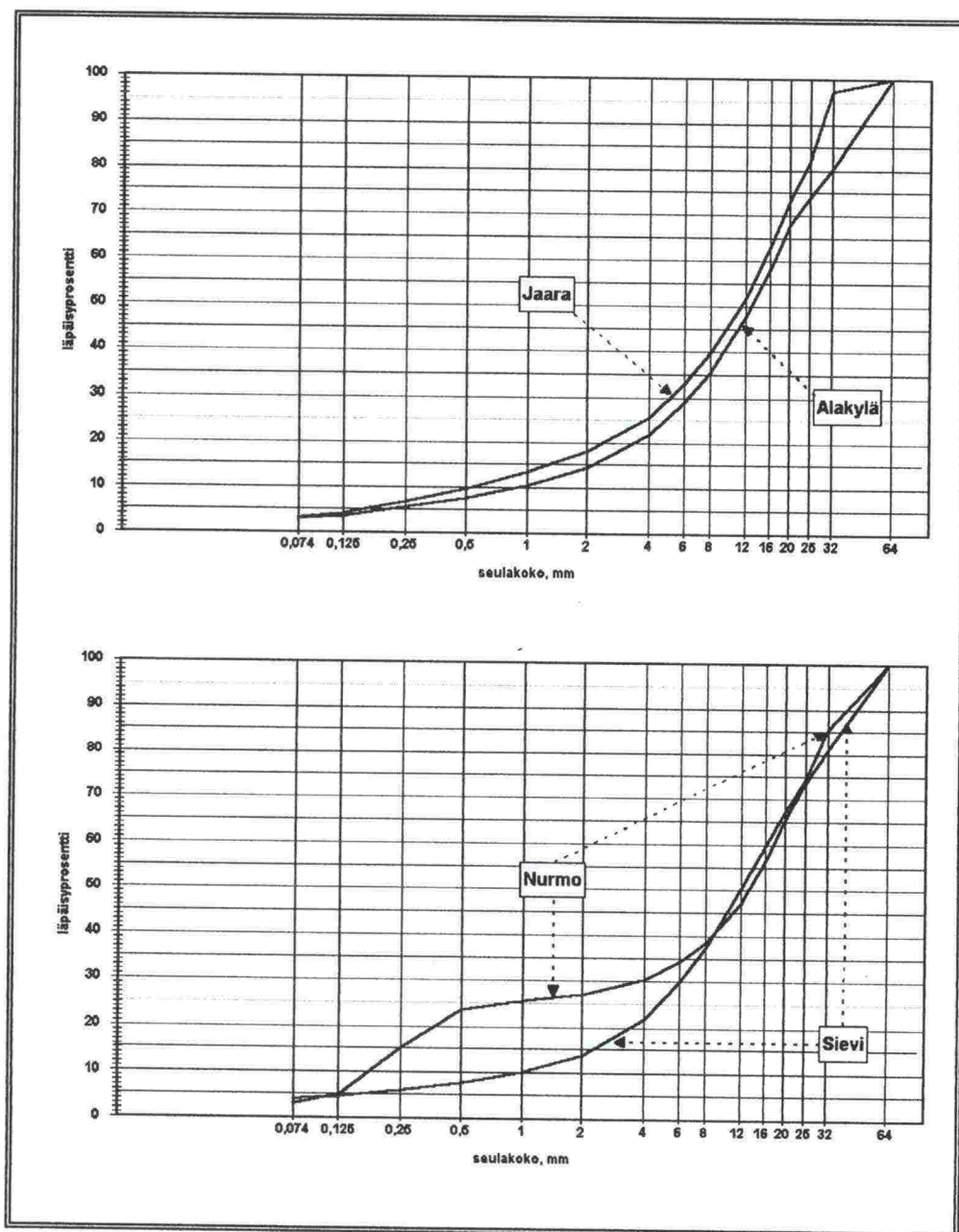
Perinteisten lujuustestien perusteella materiaalit poikkeavat selvästi toisistaan. Sievin materiaali on lujuustestien perusteella hyvä ja vastaavasti Nurmon materiaali heikko. Alakylän ja Jaaran materiaalit ovat lujuusominaisuuksiltaan Nurmon ja Sievin materiaalien välillä.

Kokeeseen valituista kiviaineksista teetettiin mineralogiset tutkimukset, joissa selvitettiin mineraalikoostumus, mineraalien esiintymismuoto, kiven rakenne ja rapautuneisuus sekä kivilaji (*Liite 1*). Samoista kivistä määritettiin pistekuormitusindeksi. Mineraalikoostumus määritettiin Sievin ja Nurmon murskeista myös TTKK:n röntgendiffraktometrillä (*Liite 2*). Kokeissa käytettyjen kalliomurskeiden keskimääräiset mineraalikoostumukset esitetään *taulukossa 3*.

Taulukko 3: Kalliomurskeiden mineraalikoostumukset

Näyte / mineraali	Sievi	Nurmo	Alakylä	Jaara
kvartsi	25%	40%	40%	30%
plagioklaasi	40%	30%	15%	20%
biotiiitti	*	20%	25%	10%
muskoviitti		5%	15%	
kalimaasälpä				40%
amfiboli	18%			
epidootti	11%			
opaakki	*	*	*	*
serisiitti			*	*
apatiitti	*	*		*
sarvivälke				*
kloriitti	*	*	*	*

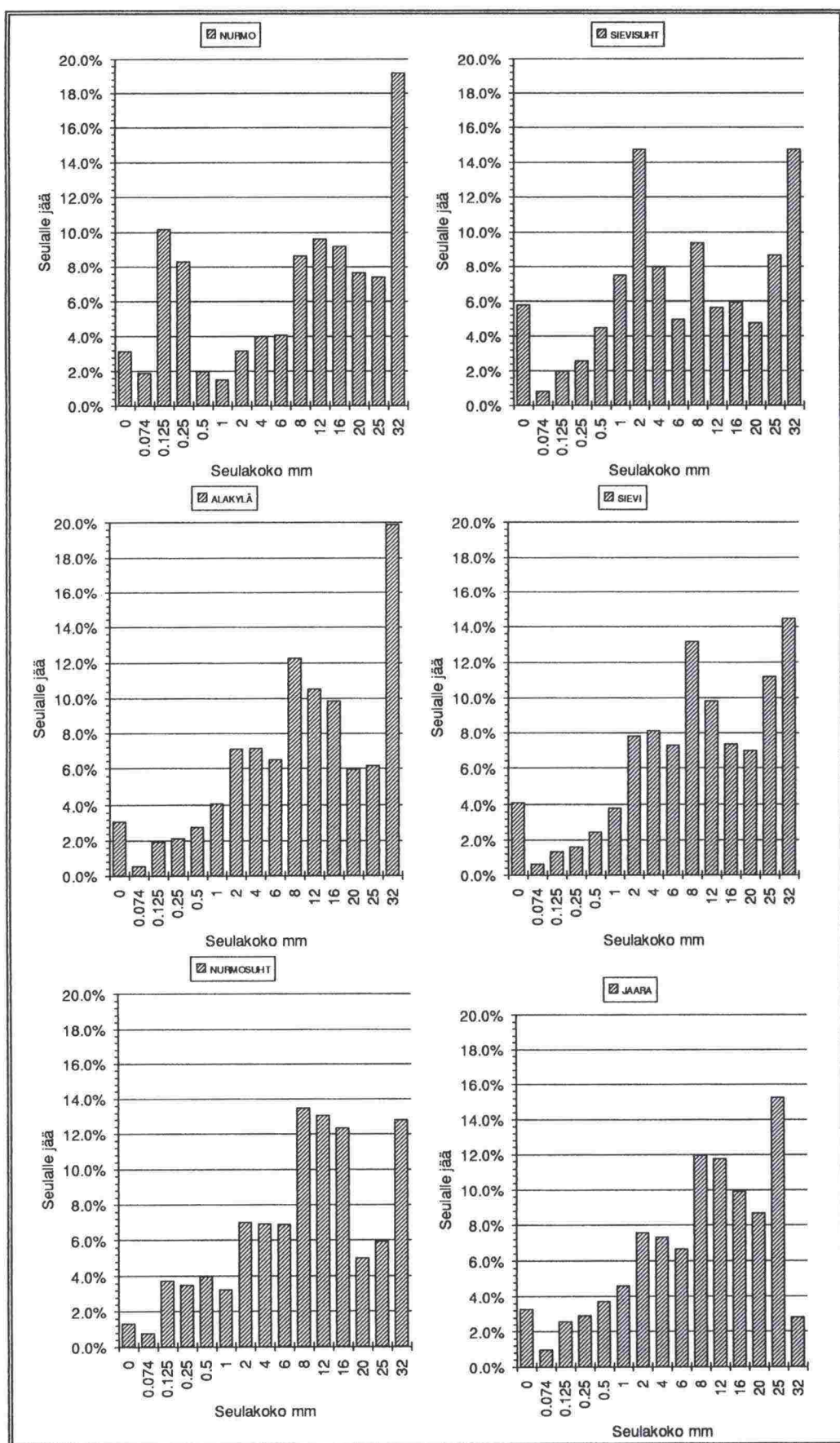
Taulukossa esiintyvä tähti tarkoittaa, että mineraalia esiintyy vähäisessä määrin (alle 5%). Tarkemmat minerologiset kuvaukset esitetään liitteessä 1. Materiaalien rakeisuudet summakäyrinä ja seulalle jääneinä prosenttiosuuksina esitetään kuvissa 2 ja 3.



Kuva 2: Kalliomurskeiden rakeisuudet

Rakeisuuskäyrät edustavat materiaalien Nurmo ja Sievi osalta kenttäkokeen nollanäytteitä. Alakylä ja Jaara ovat vastaavasti laboratoriokokeen nollanäytteitä. Näitä koostumuksia (suhteellisia osuuksia, koska maksimiraekoko oli rajoitettu) käytettiin myös, kun tutkittiin hienonemista kahdella laboratoriolaitteella; Proctor-kokeella ja IC-laitteella.





Kuva 3. Kalliomurskeiden painoprosenttisuudet fraktioittain.

Nurmon peruskäyrässä oli suhteellisen paljon lajitetta 0.125 - 0.25 mm. Laboratoriokoetta varten Nurmon materiaalista valmistettiin suhteuttamalla raekokojakaumaltaan jatkuvampi murske (Nurmosuht). Sievin materiaalin peruskäyrä oli roikkuva ja siitä suhteutettiin paremmin kantavan kerroksen ohjekäyriin sopiva murske (Sievisuht). Alakylän murske sisälsi runsaasti yli 35 mm:n rakeita, joita Jaaran murskeessa taas oli hyvin vähän.

Optimikosteus määritettiin alle 16 mm:n lajitteesta parannetulla Proctor-kokeella käyttäen muottia Ø 150 mm (taulukko 4). Suhteutettuja materiaaleja ei tutkittu erikseen. (Määritetty optimikosteus korjattiin ottamalla huomioon yli 16 mm rakeiden osuus murskeessa).

Taulukko 4: Kivisyydellä korjatut kosteudet ja saavutetut maksimi-irtotiheydet

MATERIAALI	KOSTEUS %	KORJATTU IRTOTIHEYS kg/m <sup>3</sup>
NURMO 0 - 64 mm	4.17	2140
SIEVI 0 - 64 mm	1.58	2208
ALAKYLÄ 0 - 64 mm	2.86	2262
JAARA 0 - 64 mm	2.99	2157

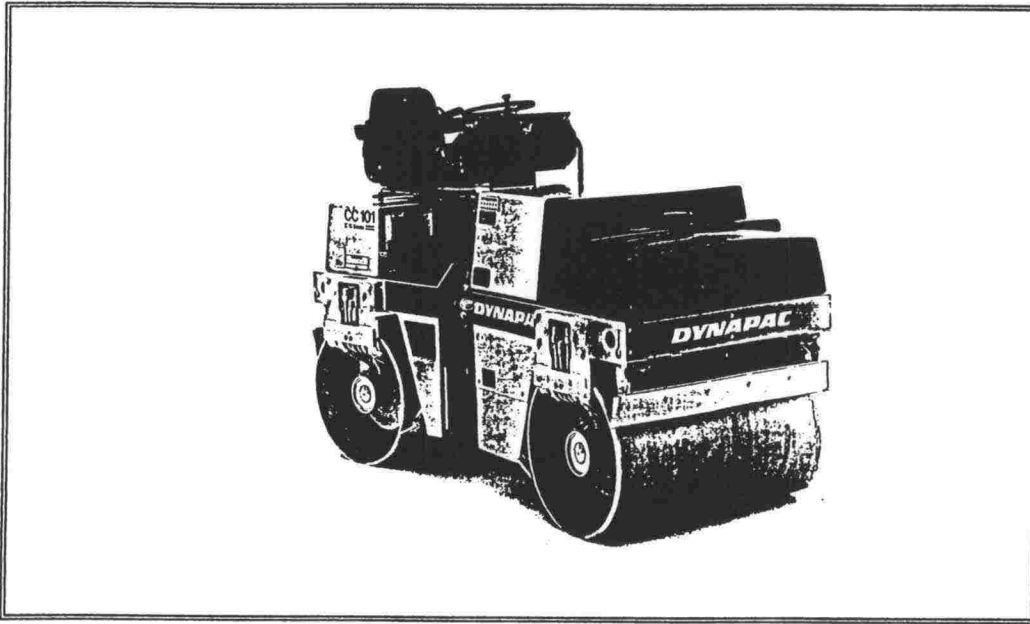
Kuivairtitiheyden kivisyyskorjaus tehtiin kaavalla 1 (Tiel 732816):

$$\rho'_{kmax} = \frac{1}{\frac{1-k}{\rho_{kmax}} + \frac{k}{(1-k)\rho_s + k\rho^s}} \quad (1)$$

jossa  $\rho'_{kmax}$  = korjattu Proctor-tiheys kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_s$  = kiviaineksen kiintotiheys  
 $\rho^s$  = kiviaineksen irtotiheys  
 $k$  = kivisyys

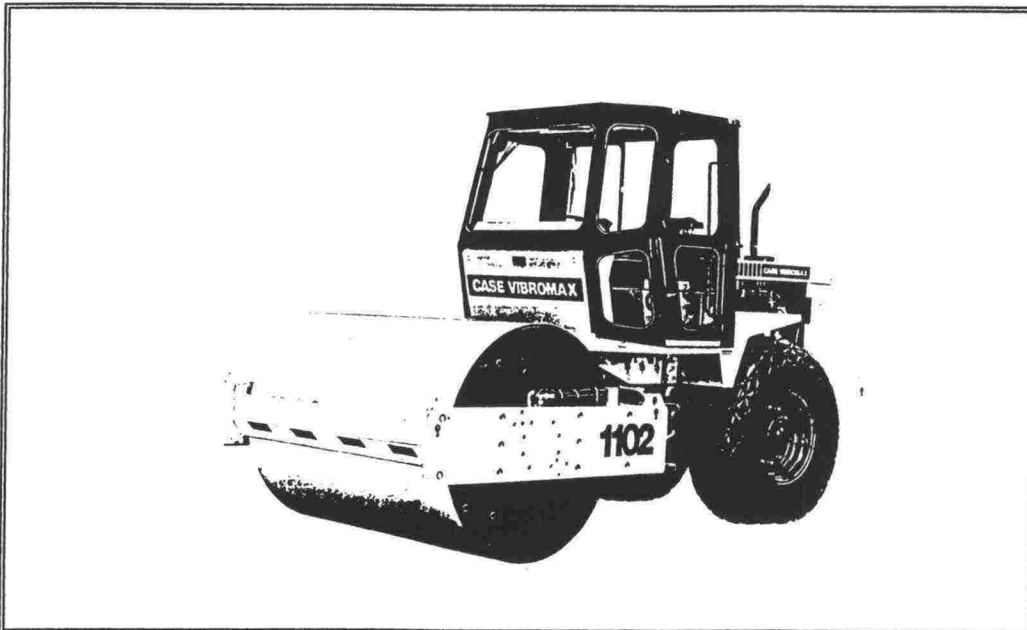
### 1.3. Jyrät

Laboratoriokokeen jyräksi vuokrattiin Dynapac CC 10 II -täryjyrä (kuva 4). Valmistaja suosittelee ko. jyrällä tiivistettävän kantavan kerroksen maksimipaksuudeksi 15 cm. Toimintakunnossa jyrän paino on 2400 kg, joka jakautuu tasan kummallekin valssille. Molemmissa valsseissa on veto ja täry. Valssin leveys on 1.07 m ja halkaisija 0.66 m. Staattinen viivapaine on 108 N/cm. Suurin nimellisamplitudi on 0.55 mm ja taajuus 50 Hz.



Kuva 4: Laboratoriokokeen jyrä

Kenttäkoetta varten vuokrattiin kumipyörävetoinen täryjyrä Case Vibromax W1102H (kuva 5). Työpaino ilman kuormaa oli 13.4 tonnia, josta etuvalssin osuus oli 8 tonnia. Viivakuorma on 357 N/cm Värähdystaajuus oli valmistajan mukaan 28/36 Hz ja amplitudi 0.6/1.9 mm. Jyrään oli liitetty Vibromaxin tiiveysmittari CT 2000, joka toimii osoitinnäytöllä.



Kuva 5: Kenttäkokeen jyrä



Amplitudit tarkistettiin valssien ollessa kahden kuorma-auton renkaan päällä (taulukko 5). Taulukossa esitetään Case-jyrän kaksi amplitudia ja Dynapac-jyrästä kumpikin täryvalssi. Ajokierrokset mitattiin tiivistämiskokeiden yhteydessä Treysit-kiekolla ja amplitudit mitattiin sitten samalla frekvenssillä.

Taulukko 5. Mitatut amplitudit valssien molemmista päistä.

CASE					DYNAPACK				
Käytetyillä ajokierroksilla					Käytetyillä ajokierroksilla				
	TÄRY	VAS	OIK	KA		VALSSI	VAS	OIK	KA
26 Hz	pieni	0.75	0.6	0.68	32 Hz	etu	0.75	1.00	0.88
22 Hz	iso	2	1.85	1.93	32 Hz	taka	0.60	1.20	0.90
Täysillä kierroksilla					Täysillä kierroksilla				
	TÄRY	VAS	OIK	KA		VALSSI	VAS	OIK	KA
37 Hz	pieni	0.75	0.65	0.70	54 Hz	etu	0.63	0.95	0.79
29 Hz	iso	1.9	1.85	1.88	54 Hz	taka	0.60	1.00	0.80

Mitatut amplitudit vastaavat valmistajan ilmoittamia arvoja, mistä voidaan päätellä, että jyrät olivat kunnossa.

## 1.4. Kokeiden suoritus

### 1.4.1. Tiheyden mittaaminen

Laboratorio- ja kenttäkokeissa jyräyksen aikaista tiivistymistä seurattiin Troxler 3440-laitteella. Kenttäkokeessa tiivistymistä seurattiin myös jyrän tiiviysmittarilla. Tiivistymisen analysointi perustuu Troxler-laitteella tehtyihin tiheysmittauksiin.

Troxler-mittauksessa saadaan laitteen näyttöön kosteusprosentti, kuivairtitiheys sekä märkäirtitiheys. Laite mittaa märkäirtitiheyden ja kosteuden. Kuivairtitiheys määritetään märkäirtitiheyden ja kosteuden perusteella.

Laadunvalvonta ja tiiviystarkkailu perustuvat yleensä kuivairtitiheyksiin, mistä syystä tässä tutkimuksessa keskitytään kuivairtitiheyteen ja sen arviointimenetelmiin.

Laboratoriokokeessa rinnakkaisia mittauspisteitä oli 2 ja kenttäkokeessa 8 kappaletta kutakin materiaalia ja jyräyskertaa kohti. Kaikissa mittauspisteissä kirjattiin sekä suora- että pintamittauksen tulokset. Laboratoriokokeessa tiheyksiä määritettiin 0, 5 ja 15 cm syvyyksiltä sekä kenttäkokeessa 0, 5, 10, 15 ja 20 cm syvyyksiltä. Mittaustulosten lukumäärät on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6:      Troxler-laitteella määritettyjen tiheyshavaintojen lukumäärät

Laboratoriokoe	Syvyys					
Materiaali	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	Yhteensä
1. Nurmo	24	0	24	24	0	72
2. Sievi	24	0	24	24	0	72
3. Sievi R	24	0	24	24	0	72
4. Nurmo R	24	0	24	24	0	72
5. Jaara	24	0	24	24	0	72
6. Alakylä	24	0	24	24	0	72
7. Nurmo S	24	0	24	24	0	72
8. Sievi S	24	0	24	24	0	72
					yhteensä	576
Kenttäkoe	Syvyys					
Materiaali	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	Yhteensä
1. Sievi	96	48	96	48	96	384
2. Nurmo	96	48	96	48	96	384
					yhteensä	768

1.4.2. Laboratoriokoe

Koetta varten valmistettiin puiset laatikot (1.19 x 2.50 x 0.20 m³). Ne sijoitettiin tasoon, joka oli kaivettu 15 cm varastokentän pinnan alapuolelle. Täyttövaiheessa varrottiin lajittumien syntymistä. Laatikot täytettiin takareunasta alkaen sankomenetelmällä, eli materiaali kannettiin paikalle sangoissa, jotka kumottiin vieriviereen. Kerrospaksuudessa pyrittiin tiivistettyyn paksuuteen 15 cm. Tiivistämättömänä (löyhä täyttö) paksuus oli noin 18 cm (kuva 6). Laatikoiden välit ja reunat tuettiin soralla ja murskeella.





Kuva 6: Laatikot 1 (Nurmo) ja 2 (Sievi) täytön jälkeen

Troxler-mittauksia varten laatikoihin sijoitettiin muoviset mittausputket (sivu 66). Toisen putken viereen (putki B) laatikon pohjalle asetettiin pala suodatinkangasta pohjanäytettä varten.

Koe kesti kolme päivää: 16.07.92 (torstai), 17.07.92 (perjantai) ja 20.07.92 (maanantai). Sää kokeen aikana oli vaihteleva, mutta enimmäkseen sateinen. Tuuli vaihteli 2 - 4 metriin sekunnissa ja lämpötila aamun +10:stä iltapäivän +19°C:een.

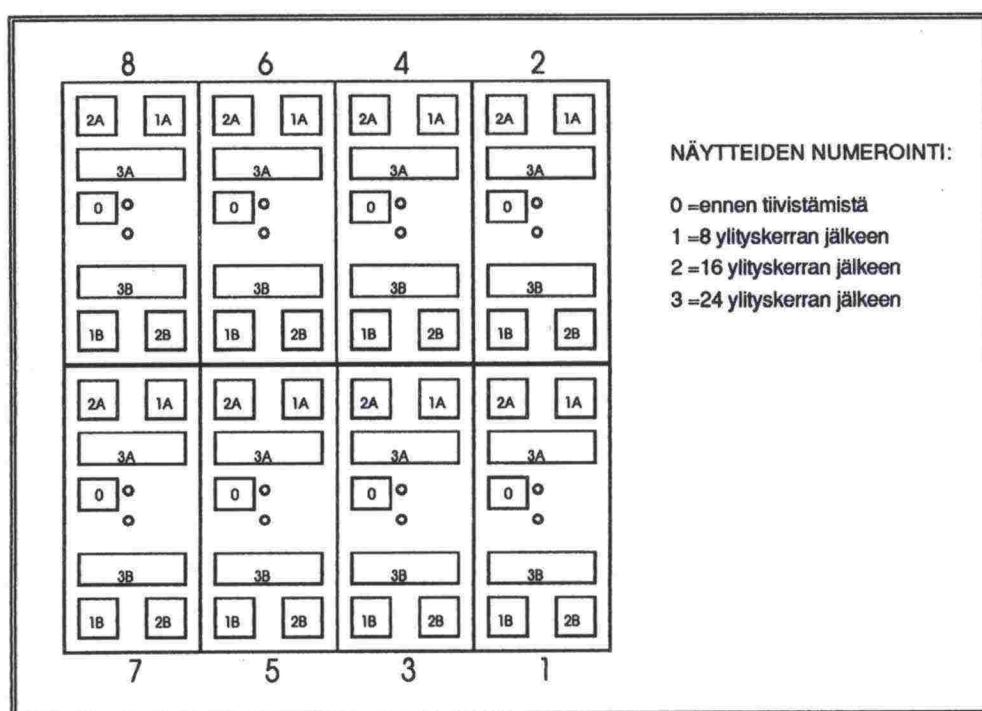
Troxler-laitteella mitatun kosteuskukeman perusteella laskettiin vesimäärä, jolla päästäisiin optimikosteuteen. Vesi lisättiin kastelukannulla ja se sai imeytyä vähintään tunnin ennen jyräysten aloittamista. Osa kokeista tehtiin heikossa vesisaatteessa, muuten vettä ei lisätty kokeen aikana. Koelaatikot suojattiin peitteillä aina yön ajaksi ja tarvittaessa myös sateen yltessä.

Ennen varsinaisia koejyräyksiä tehtiin yksi jyräys ilman täryä pinnan tasoittamiseksi. Sen jälkeen tasattiin Troxler-mittauksen alustat ohuella kerroksella 0 - 6 mm:n mursketta.

Tiheysmittaukset tehtiin tielaitoksen Troxler 3440 -laitteella sekä pinta- että suoramittauksena. Mittausaika oli aina 1 min. Suoramittaus tehtiin kunkin laatikon keskelle asetetuista putkista sivulle päin (A oikealle, B vasemmalle). Märkäirtotiheys, kuivairtotiheys ja kosteusprosentti luettiin aina parillisten ylitysten jälkeen (0 - 24). Pintamittauksessa (syvyys 0) laitetta siirrettiin pari cm pois reiän päältä.

Jyrän nopeutena käytettiin 3.5 km/h, jolloin värähtelytaajuus oli 32 Hz. Jyrällä ajettiin aina eteenpäin. Laatikko tiivistettiin vuorotellen kummastakin suunnasta (yli ja takaisin).

Materiaalinäytteet otettiin erillisen suunnitelman mukaan kahdesta kerroksesta: 0 - 5 cm ja 5 - 10 cm ja ne suljettiin muovipussiin. Näytekooko oli noin 6 kg. 0-näytteet ja näytteet 24 ylityksen jälkeen otettiin myös pohjalta, eli syvyydeltä 10 - 15 cm. Välineenä oli pieni näytelapio (10 x 15 cm). Syntyneeseen kuoppaan lisättiin vastaava määrä mursketta, joka tiivistettiin polkemalla (kuva 7).



Kuva 7: Laboratoriokokeen näytteenottopaikat ja numerointi. Ympyrät kuvaavat Troxlerin mittauspisteitä.

### 1.4.3. Kenttäkoe

Kenttäkokeen alue pintavaaettiin ennen levitystä ja todettiin korkeustason vaihteluksi alle 5 cm. Varsinainen koealue koostui kahdesta 16 m pitkästä ja 2.5 m leveästä kaistasta. Murskekerros levitettiin 23 cm paksuisena, millä pyrittiin jyräysten jälkeiseen 20 cm:n paksuuteen. Koealueen sivut tuettiin nostamalla kentän (jakavan kerroksen) materiaalia tiehöylällä kaistojen viereen. Kaistojen päihin n. 5 metrin matkalle levitettiin tukikerroksen lisäksi kerros kalliomursketta, jotta estettäisiin valssiin tarttuvan hiekan kulkeutuminen koealueelle.

Troxler-mittauksia varten asennettiin yhteensä 16 pysyvää mittausputkea, joiden rakennetta oli vielä parannettu edellisestä kokeesta. Pohjamaan päälle oli ennen murskeen levitystä asetettu 10 kpl suodatinkangaspaloja loppunäytteiden kohdille (näyte otettiin myös kerroksen alaosa). Ennen levittämistä murskekasat sekoitettiin lajittumisen välttämiseksi. Levitys tehtiin pyöräkuormaajalla ja tasaus tie-



höylällä. Työkoneet alkutiivistivät jo osaltaan tutkittavaa kerrosta. Näytteenottopai-  
kat ja Troxler-mittaukset sijoituivat kaistan keskiosalle pyöräurien väliin (kuva 8).



*Kuva 8: Murskeen levitys kenttäkoetta varten*

Koealue sai olla viikon kosteassa säässä ennen kokeiden alkua. Troxlerin antaman kosteuslukeman perusteella oltiin riittävän lähellä laboratorioissa määritettyä optimikosteutta, jolloin kastelua ei tarvittu. Sää kokeen aikana oli sateinen. Kenttäkoe kesti neljä päivää ( tiistai 25.08 - perjantai 28.08 ).

Aluksi tiivistettiin jyrän levyiset osuudet reunatäytöstä suurella amplitudilla ajaen. Koealue jyrättiin kertaalleen ilman täryä, jotta saataisiin Troxler-mittauksille tasaisempi alusta ilman merkittävän suurta tasaushiekan käyttöä.

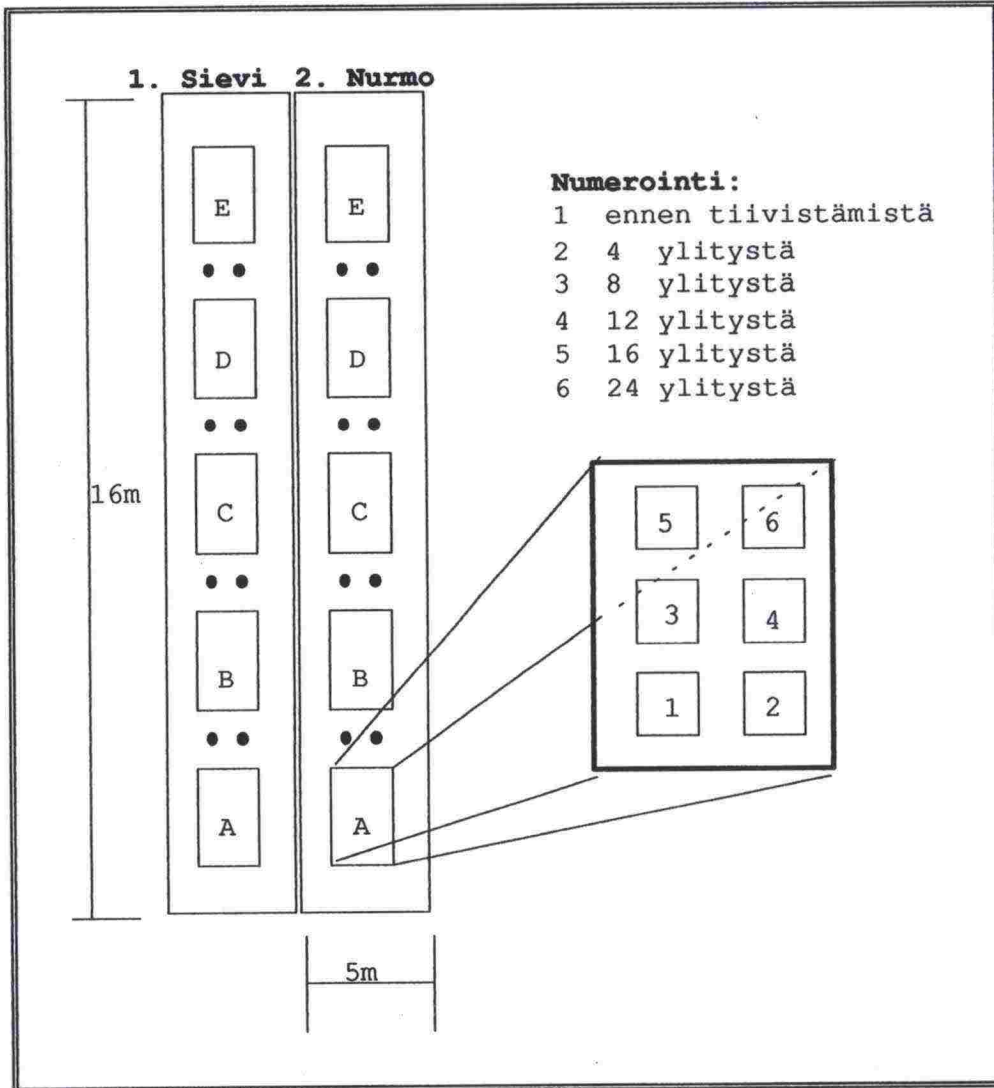
Tiheysmittaukset tehtiin kaistan keskelle asetetuista putkista aina parillisten ylitysten jälkeen (0 - 24) kuten laboratoriokokeessa. Joka toinen putkipari mitattiin vain pinnasta sekä 10 ja 20 senttimetrin syvyydeltä. Puolet putkista mitattiin edellisen lisäksi 5 ja 15 senttimetrin syvyydeltä.

Neljä ensimmäistä ylitystä ajettiin suurella amplitudilla ja loput pienellä. Mittausten suuresta määrästä johtuen kokeet jaettiin neljälle päivälle. Koe aloitettiin Sievin murskeesta siten, että ensimmäisenä päivänä jyrättiin 12 kertaa ja otettiin näytteet. Toisena päivänä tehtiin Sievi loppuun. Nurmo aloitettiin vastaavasti kolmantena päivänä ja lopetettiin neljäntenä.

Jyrän nopeutena käytettiin noin 4 km/h. Jyrällä ajettiin aina eteenpäin. Koealue tiivistettiin vuorotellen kummastakin suunnasta (yli ja takaisin). Sateella jyrän valssi lakaistiin puhtaaksi ennen kutakin ylitystä, jotta kentän pinnasta tarttunut hiekka ei

sotkisi koealuetta. Jyrän tiiveysmittarin näyttämää seurattiin sanelemalla lukema aina kolmen metrin välein.

Materiaalinäytteet otettiin kahdesta kerroksesta: 0 - 5 cm ja 5 - 10 cm erillisen suunnitelman mukaan noin 6 kg:n kokoisina ja ne suljettiin muovipussiin (kuva 9). Lisäksi otettiin 24 ylityksen jälkeen näytteitä syvyydeltä 10 - 15 cm. Syntyneeseen kuoppaan lisättiin vastaava määrä mursketta, joka tiivistettiin polkemalla ennen uutta jyräystä (kuva 10).



Kuva 9: Kenttäkokeen näytteenottopaikat ja numerointi. Ympyrät kuvaavat Troxlerin mittauspisteitä.





Kuva 10: Kenttäkokeen näytteenotto

## 1.5. Tiivistyminen jyräyskokeissa

### 1.5.1. Troxler-laitteella määritettyjen tiheyksien ja kosteuksien kalibrointi

Kalibrointimittaukset tehtiin teräslaatikossa, jonka mitat olivat  $0.45 \times 0.45 \times 0.30 \text{ m}^3$ . Laatikoon oli suoramittausta varten asennettu muovinen mittaussputki, jonka avulla tiheys voidaan mitata löyhdyttämättä tiivistynyttä materiaalia.

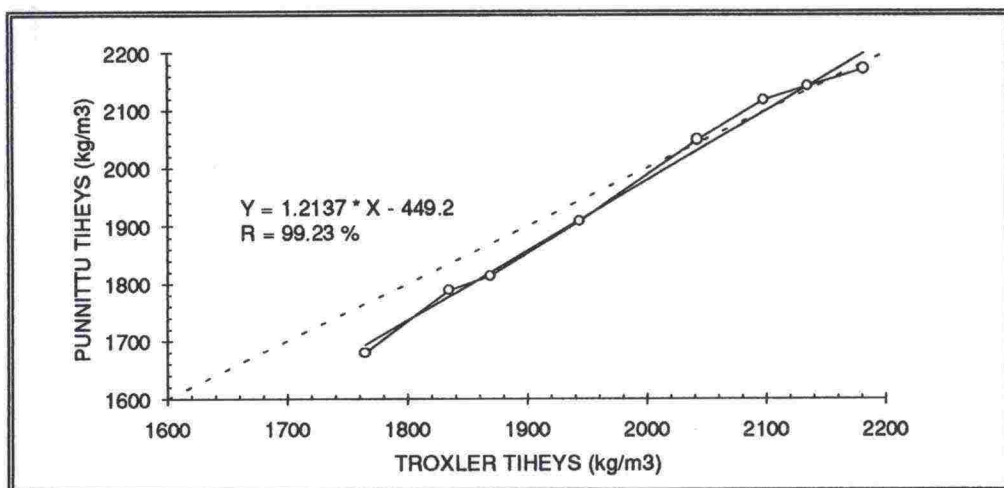
Kiviaines punnittiin laatikkoon, pinta tasattiin ja materiaalia tiivistettiin asteittain Kobralla. Troxler-tiheydet ja -kosteus mitattiin jokaisen tiivistyksen jälkeen. Samalla mitattiin materiaalin pinnan korkeuden muutos ja sen perusteella laskettiin tilavuus. Tilavuuden ja massan perusteella puolestaan laskettiin "todellinen" tiheys.

Materiaalien tiheyksiä määritettäessä havaittiin, että tiheys on suurin rakenteen pintaosassa ja tiheys pienenee syvemmillä rakenteessa. Kyseistä syvyys-suuntaista jakaumaa ei voida määrittää punnitsemalla, koska sillä saadaan ainoastaan koko näytteen paino ja sitä kautta keskimääräinen tiheys. Suoramittauksen avulla saadaan tiheys, joka myös edustaa keskimääräistä tiheyttä pinnan ja mittaussyvyyden välillä. Tästä syystä kalibrointi-arvoiksi valittiin mahdollisimman syvältä eli 20 cm syvyydeltä määritetyt tiheydet.

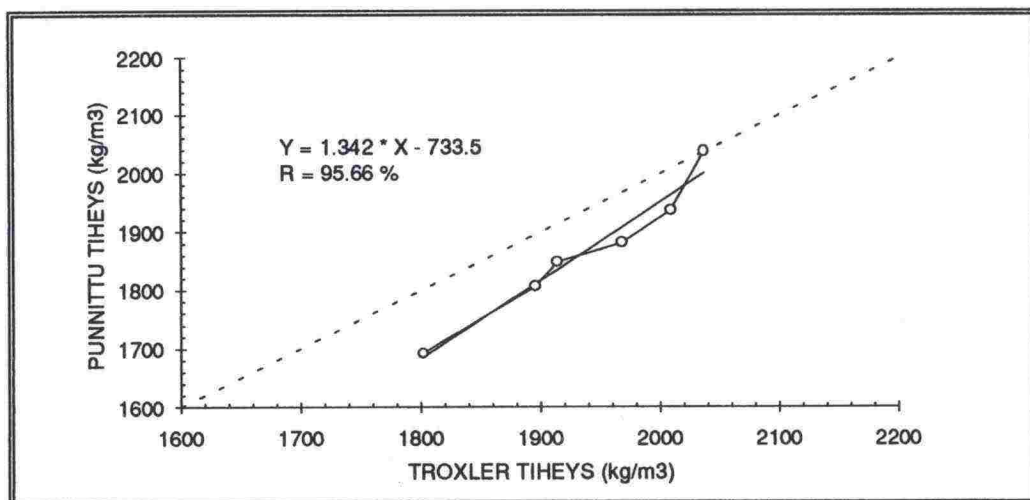
Kalibroinnissa käytetyllä tiivistysmenetelmällä ei kaikilla materiaaleilla saavutettu yhtä suuria kuivairtotiheyden arvoja kuin jyrättäessä. Mikäli suuria kentällä mitattuja

tiheyden arvoja joudutaan korjaamaan kalibrointikäyriä ekstrapoloimalla, saatetaan päätyä virheelliseen tulokseen.

Kalibroinnissa määritetyt tiheydet jokaisella materiaalilla käyttäytyvät säännöllisesti ja niitä voidaan regressioyhtälöiden selitysasteiden perusteella kuvata hyvin suorilla. Troxler-laitteella määritetyt kuivairtitiheydet ovat yleensä suurempia kuin todelliset arvot (kuvat 11, 12, 13, 14).

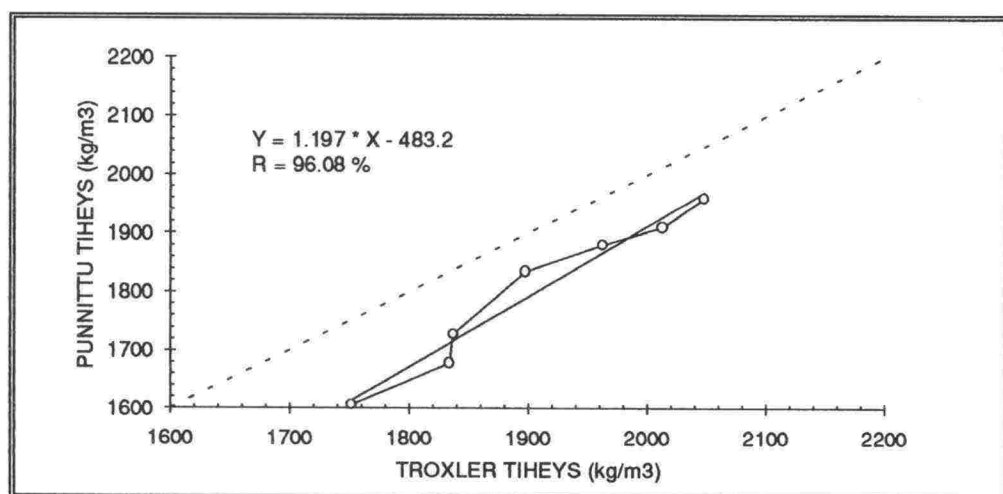


Kuva 11: Sievin materiaalin kuivairtitiheyden kalibrointi

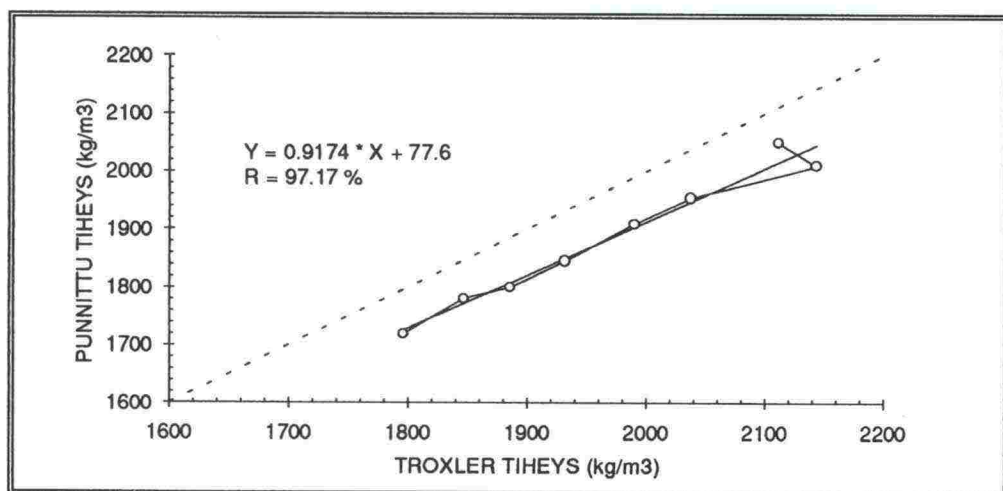


Kuva 12: Nurmon materiaalin kuivairtitiheyden kalibrointi





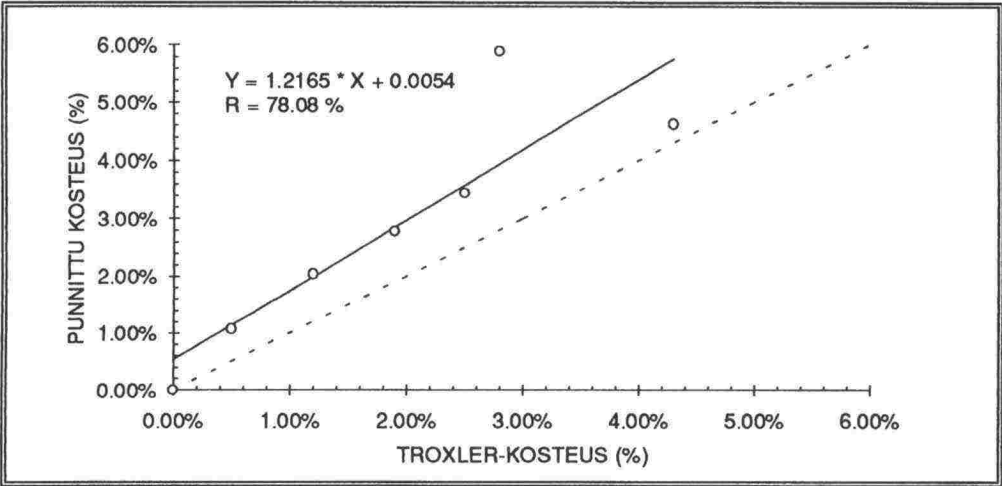
Kuva 13: Jaaran materiaalin kuivairtitiheyden kalibrointi



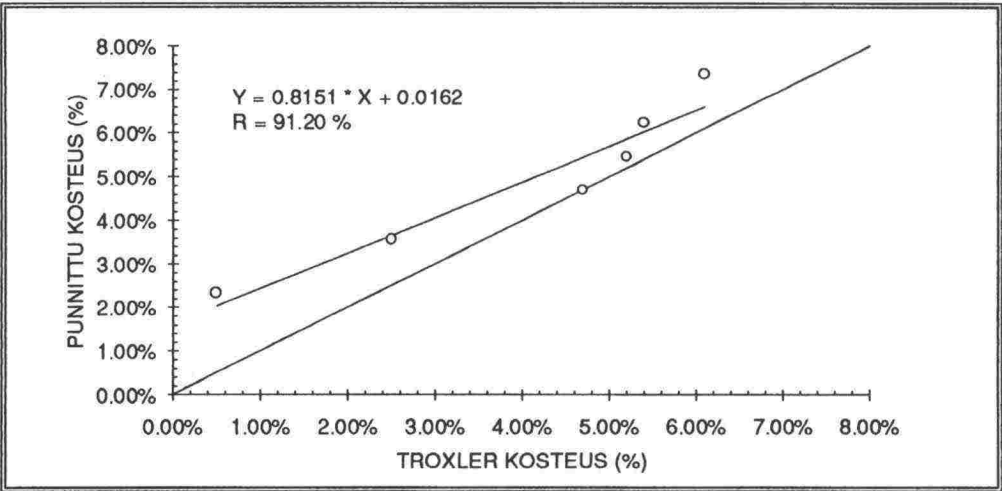
Kuva 14: Alakylän materiaalin kuivairtitiheyden kalibrointi

Kosteuden määrittäminen suurilla kosteuspitoisuuksilla ( $\geq 6\%$ ) aiheuttaa ongelmia. Troxler-laitte mittaa kosteuden heijastusperiaatteella eli pintaosan sisältämä kosteus on määrävä tekijä. Karkea materiaali ei juurikaan pidätä vettä, vaan vesi valuu nopeasti alemmaksi. Proctor-kokeessa määritetyt optimivesipitoisuudet (1.58 - 4.17 %) eivät kuitenkaan olleet niin suuria, että edellämainittu seikka vaikuttaisi merkittävästi materiaalien kosteuksiin.

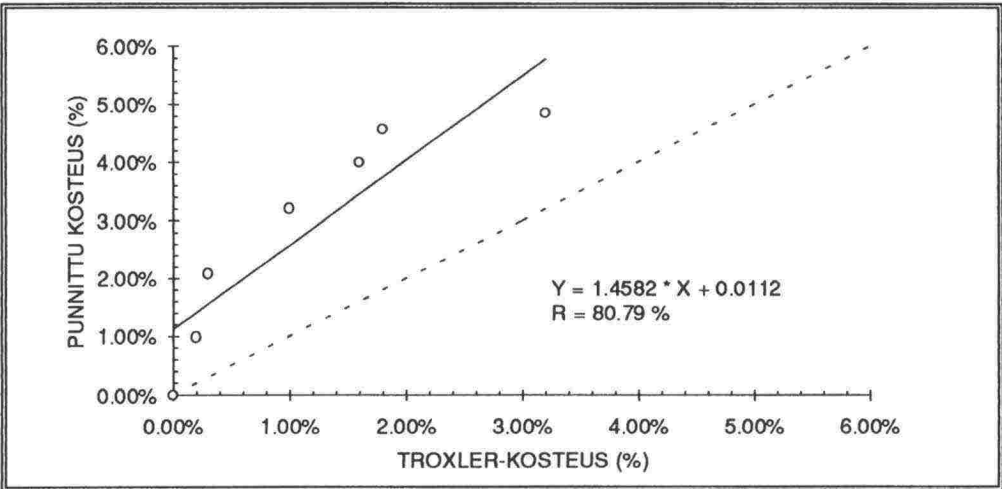
Materiaalin "todellinen" kosteus määritettiin erikseen jokaisella mittauskerralla: Kosteaa näyte punnittiin, kuivattiin ja kuivattu näyte punnittiin uudelleen. Näiden perusteella laskettiin todelliset kosteuspitoisuudet, joita verrattiin Troxler-mittauksesta saatuihin tuloksiin (kuvat 15, 16, 17, 18).



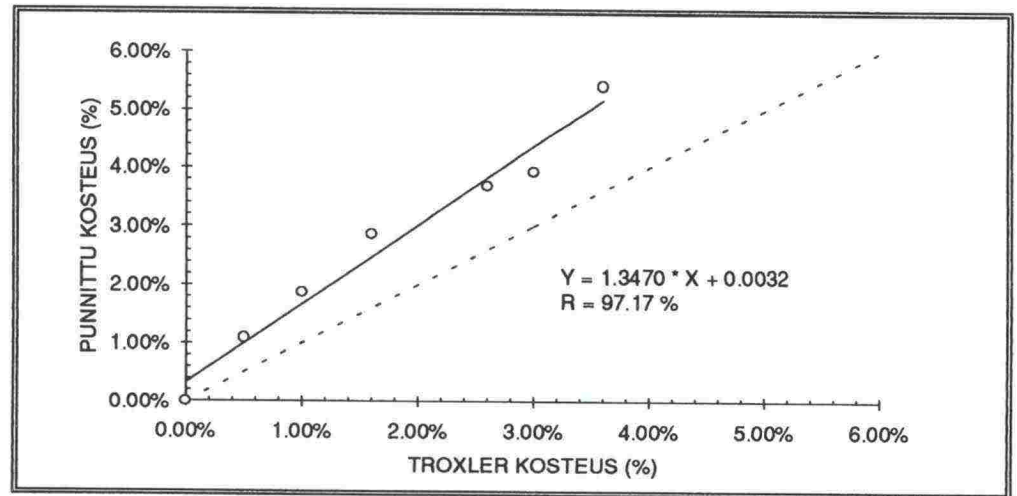
Kuva 15: Sievin materiaalin kosteusprosentin kalibrointi



Kuva 16: Nurmon materiaalin kosteusprosentin kalibrointi



Kuva 17: Jaaran materiaalin kosteusprosentin kalibrointi



Kuva 18: Alakylän materiaalin kosteusprosentin kalibrointi

Todelliset kosteudet ovat aina Troxler-laitteella mitattuja arvoja suuremmat. Ero kasvaa kosteuden lisääntyessä kaikilla muilla paitsi Nurmon materiaalilla. Nurmon materiaali sisältää muihin materiaaleihin verrattuna runsaasti # 0.125 - # 0.5 lajitetta, millä saattaa olla vaikutusta materiaalin kykyyn pidättää vettä kerroksen pintaosassa.

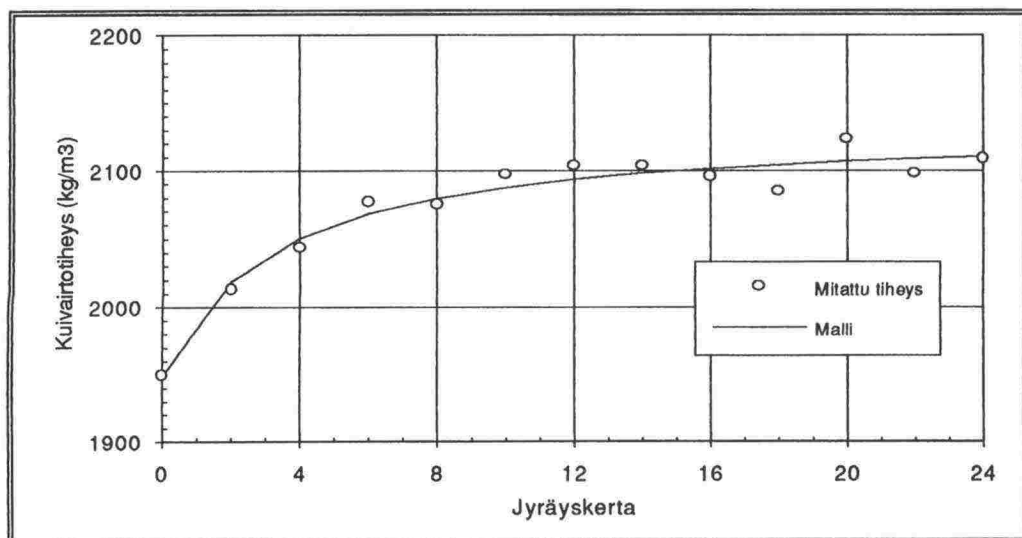
Ero optimikosteuden ja Troxler-laitteen vastaavan arvon välillä on yleensä alle yhden prosenttiyksikön. Proctor-kokeesta saadut optimivesipitoisuuden määrittäyskäyrät ovat laakeahuippuisia, jolloin pieni ero kosteudessa vaikuttaa vain vähän saavutettavaan maksimitiheyteen. Optimikosteudet ja Troxler-laitteen vastaavat lukemat on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Materiaalien Proctor-kokeella määritetyt optimikosteudet ja optimikosteutta vastaavat Troxler-lukemat

Materiaali	Proctor-optimikosteus	Troxler-kosteus
Nurmo	4.17 %	3.13 %
Sievi	1.58 %	0.86 %
Alakylä	2.86 %	1.89 %
Jaara	2.99 %	1.28 %

### 1.5.2. Tiivistymisen arviointi ja laskentamalli

Tiheys kasvaa jyräksen alkuvaiheessa nopeasti ja hidastuu jyräskertojen lisääntyessä. Ilmiö todettiin sekä kenttä- että laboratoriokokeissa. Myös yksittäisten pisteiden tiheyden kehitys on hyvin säännöllistä (Kuva 19).



Kuva 19: Yksittäisen mittauspisteen tiheyden kehittyminen kenttäkokeessa. (Nurmon materiaali, mittauspiste 1)

Tiheyden kasvu jyräyskertojen mukaan on säännöllistä. Tiheyden kehittymistä voidaan kuvata eräin rajoituksin kaavalla 2. Yhtälöön ei kuitenkaan voida sijoittaa  $n$ :n arvoa 0, sillä  $\log(0)$  on määrittelemätön. Tällöin 0-jyräyskerta joudutaan jättämään pois regressiosta tai vaihtoehtoisesti arvoon  $n$  joudutaan lisäämään jokin vakio.

$$\rho = A \cdot \log(n) + B \quad (2)$$

missä  $\rho$  = tiheys  
 $n$  = jyräyskerta  
 $A$  = regressiokerroin  
 $B$  = regressiovakio.

Logaritmiyhtälön rajoitusten takia muodostettiin yhtälö 3, jonka kuvaaja on myös käyräviivainen. Tekijä  $V$  vaikuttaa voimakkaasti käyrän kaarevuuteen. Sen arvo joudutaan iteroimaan kussakin tapauksessa erikseen. Tässä tutkimuksessa  $V$ :n arvot vaihtelivat välillä 2 - 9.

$$\rho = A \cdot \frac{1}{n + V} + B \quad (3)$$

missä  $V$  = käyrän kaarevuuteen vaikuttava tekijä.

Kaavan 3 avulla voidaan arvioida, kuinka suureen tiheyteen voidaan päästä käytettävällä jyräyskalustolla vallitsevissa olosuhteissa. Kun kaavaan 3 sijoitetaan äärettömän monta jyräyskerta ( $n \rightarrow \infty$ ), niin saadaan arvio suurimmasta mahdollisesta tiheydestä (kaava 4).



$$\rho_{\max} = B \quad (4)$$

missä  $\rho_{\max}$  = suurin mahdollinen tiheys

Käytännössä jyrääminen maksimitiheyteen ei ole järkevää, koska siihen tarvitaan äärettömän monta jyräyskertaa. Tavoitetiheyden arvona voitaneen käyttää esimerkiksi 95 % maksimitiheyden arvosta. 95 %-tiheyteen vaadittavien jyräyskertojen lukumäärä  $n_{0,95}$  saadaan kaavalla 5.

$$n_{0,95} = -A * \frac{1}{0.05 * B} - V \quad (5)$$

### 1.5.3. Tiivistymistulokset

Troxler-laitteella mitatuista kuivairtotiheyksistä laskettiin aluksi rinnakkaismittausten keskiarvot (sama jyräyskerta, sama määrittäisyvyys) laboratorio- ja kenttäkokeissa. Tämän jälkeen laskettiin kaavaan 3 perustuvat regressio- ja iteraatioarvot (taulukko 8). Kuivairtotiheyksiä ei korjattu kalibrointiyhtälöillä, koska Nurmon materiaalin kalibrointi-arvot olisi jouduttu ekstrapoloimaan. Kuivairtotiheyksien kalibromattomuus vaikuttaa saatavien parametrien suuruuksiin, mutta ei niiden keskinäiseen järjestykseen.

Taulukossa 8 on ensimmäisessä sarakkeessa materiaalin tunnus. Laboratoriokokeen tunnuksissa oleva R tarkoittaa rinnakkaisnäytelaatikkaa. Vastaavasti kirjain S tarkoittaa suhteutettua materiaalia. Toiseen sarakkeeseen on merkitty määrittäisyvyys. Vakiot A ja B ovat kaavan 3 mukaiset regressioparametrit. Regressioyhtälön selitysaste R on viidennessä sarakkeessa.  $\rho_{95\%}$  on 95% siitä maksimikuivairtotiheydestä, joka voidaan saavuttaa vallitsevissa olosuhteissa.  $n_{0,95}$  on se jyräyskertojen lukumäärä, joka vaaditaan 95% tiheyden saavuttamiseksi.

Taulukko 8: Tiivistymisyhtälön regressiokertoimet, selityssasteet, iterointivakiot, 95% tiheydet ja 95% tiheyteen vaadittavat jyräskerrat

Kenttäkoe	Syvyys (cm)	A	B (kg/m <sup>3</sup> )	R	V	n <sub>0,95</sub> (kpl)	p <sub>95%</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
Sievi	0	-2636	2221	96.33%	7	16	2110
Sievi	5	-2093	2212	99.73%	6	13	2102
Sievi	10	-2085	2156	99.16%	7	12	2048
Sievi	15	-2623	2167	99.68%	9	15	2059
Sievi	20	-1802	2099	99.34%	7	11	1994
Nurmo	0	-3056	2325	97.85%	9	17	2209
Nurmo	5	-2030	2280	98.08%	7	11	2166
Nurmo	10	-1714	2248	98.41%	7	8	2135
Nurmo	15	-1147	2206	99.18%	5	5	2096
Nurmo	20	-1070	2197	96.82%	5	4	2087
Laboratoriolokoe	Syvyys (cm)	A	B (kg/m <sup>3</sup> )	R	V	n <sub>0,95</sub> (kpl)	p <sub>95%</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
1. Nurmo	0	-2363	2361	95.70%	5	15	2243
1. Nurmo	10	-1314	2238	98.79%	4	8	2126
1. Nurmo	15	-1569	2230	98.98%	5	9	2119
2. Sievi	0	-614	2108	94.99%	2	4	2003
2. Sievi	10	-1150	2122	99.26%	4	7	2016
2. Sievi	15	-1187	2119	99.15%	4	7	2013
3. Sievi R	0	-876	2256	93.56%	2	6	2143
3. Sievi R	10	-669	2151	97.18%	2	4	2043
3. Sievi R	15	-862	2118	96.77%	3	5	2012
4. Nurmo R	0	-1080	2353	80.58%	3	6	2235
4. Nurmo R	10	-721	2228	97.62%	3	3	2117
4. Nurmo R	15	-497	2162	93.02%	2	2	2054
5. Jaara	0	-1828	2116	98.83%	4	13	2010
5. Jaara	10	-1345	2060	98.63%	4	9	1957
5. Jaara	15	-799	2041	99.44%	3	5	1939
6. Alakylä	0	-1590	2235	97.04%	4	10	2124
6. Alakylä	10	-851	2170	99.06%	3	5	2062
6. Alakylä	15	-804	2137	99.08%	3	4	2030
7. Nurmo S	0	-1695	2313	90.75%	3	11	2197
7. Nurmo S	10	-1328	2184	97.88%	4	8	2075
7. Nurmo S	15	-1030	2118	99.35%	3	6	2012
8. Sievi S	0	-3685	2432	91.89%	7	23	2310
8. Sievi S	10	-985	2177	96.73%	3	6	2069
8. Sievi S	15	-769	2162	98.66%	3	4	2054

Suurimmat saavutettavat tiheydet ovat kerroksen pintaosassa. Tiheydet pienenevät määrityssyvyyden kasvaessa. Jyräys vaikuttaa eniten kerroksen pintaosaan. Kenttäkokeessa ero pinnan ja 20 cm syvyydestä määritetyn tiheyden välillä on noin  $100\text{kg/m}^3$  ja vastaavasti laboratoriokokeessa suurimmillaan Sievin suhteutetulla materiaalilla noin  $270\text{ kg/m}^3$ .

Regressioyhtälöiden selitysasteet ovat erittäin korkeita, kun tarkastellaan suoramittauksella määritettyjä arvoja. Alhaisin yksittäinen selitysaste on Nurmon laboratoriokokeen rinnakkaisnäytteen pintaosasta määritetty 81%. Kaikki muut selitysasteet ovat yli 90 % ja tyypillisesti 98-99%.

Kaarevuuteen vaikuttava tekijä V on kenttäkokeessa keskimäärin 7 ja laboratoriokokeessa keskimäärin 3.5. Laboratoriokokeessa käytetyn jyrän molemmat valssit olivat täryttäviä, mikä saattaa vaikuttaa kyseisen eroon.

Vaadittavien jyräskertojen perusteella voidaan päätellä, että tiivistämistä kannattaa jatkaa pisimmälle, kun tarkastellaan jyrättävän kerroksen pintaosan tiheyden kehittymistä. Jos tarkastellaan alempien osien tiheyden kehittymistä, jyräys voidaan päättää aikaisemmin. Vaadittava jyräskertojen määrä riippuu selkeästi materiaalista.

Maksimitiheydestä lasketut 95% tiheydet ovat rinnakkaiskokeissa lähes yhtä suuret. Eri materiaalien väliset tiheyserot ovat selvät.

Suhteutuksella on selvä vaikutus saavutettavaan maksimitiheyteen. Nurmon perusmateriaalin raekäyrässä oli kohouma # 0.125 - # 0.5 mm raekokoalueella. Nurmon suhteutetusta materiaalista kohouma poistettiin. Tällä tavoin suhteutetun materiaalin tiheys kasvaa hitaammin ja päättyy pienempiin arvoihin kuin vastaavan suhteuttamattoman materiaalin tiheys.

Sievin materiaalista muodostettiin suhteuttamalla ns. "roikkuva" käyrä eli lajitteiden # 6 - # 25 osuutta pienennettiin. Tämä vaikutti tiivistymiseen siten, että varsinkin pinnassa saavutettiin huomattavasti suuremmat tiheydet kuin perusmateriaalilla.

Laboratorio- ja kenttäkokeissa saavutettiin samaa suuruusluokkaa olevat maksimitiheydet eri syvyyksillä, vaikka jyrrien painot olivat selvästi erilaisia (laboratoriokoe 2 400 kg, kenttäkoe 13 000 kg). Sen sijaan laboratoriokokeessa saavutettiin 95%-tiheys selvästi vähemmillä jyräskerroilla kuin kenttäkokeessa. Laboratoriokokeessa käytetyn jyrän kaksi täryttävää valssia saattaa selittää edellä mainitun seikan.

## 1.6. Hienoneminen jyräskokeissa

Materiaalien hienonemista seurattiin ottamalla näytteet 0-5, 5-10 ja 10-15 cm syvyyksiltä. Näytteistä määritettiin rakeisuudet pesuseulontaa apuna käyttäen. Lisäksi osasta näytteitä tehtiin areometrimääritykset.

Läpäisyprosenttien keskiarvot laskettiin rinnakkaisnäytteistä (sama syvyys, sama koealue, sama jyräskerta). Keskiarvoläpäisyprosentit muutettiin kutakin seulako-



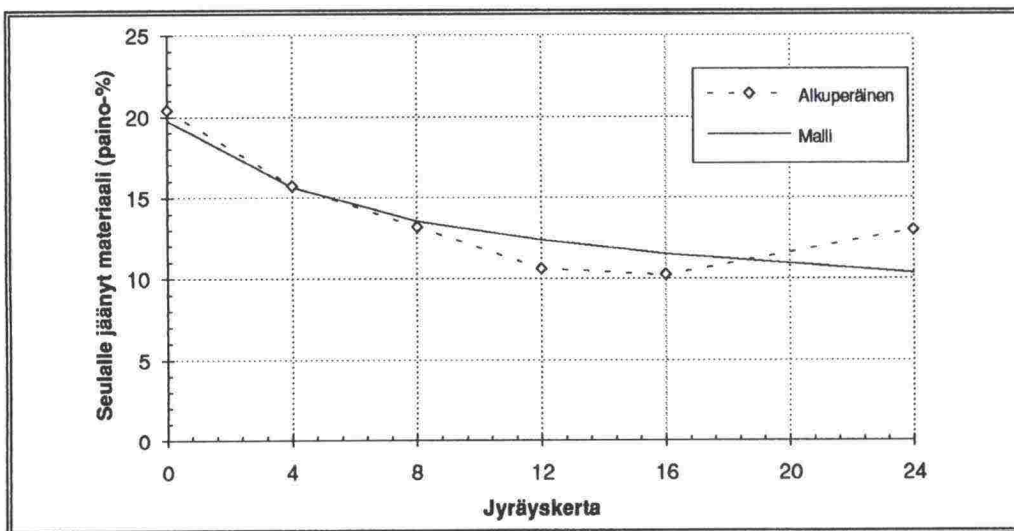
koa vastaavaksi seulalle jääneeksi materiaalmääräksi (painoprosenttia koko näytteestä).

Kenttäkokeessa otettiin 5 ja laboratoriokokeessa 2 rinnakkaisnäytettä. Tulosten tulokinnan helpottamiseksi muodostettiin regressioyhtälöt seulallejääneen materiaalin ja jyräyskertojen välille (yhtälö 6).

$$s_n = A \cdot \log(n) + B \quad (6)$$

missä  $s_n$  = Seulalle jäänyt materiaali (paino-%)  
 $A$  = Regressiokerroin  
 $B$  = Regressiovakio  
 $n$  = Jyräyskerta

Selitysasteet eivät olleet kovin korkeita. Alhaiseen selitysasteeseen vaikuttanee osaksi näytteenoton vaikeus ja materiaalien lajittuminen koekentällä. Regressiokuvaajia tarkasteltaessa näyttää siltä, että seulakoon materiaalmäärän muutokset tapahtuvat nopeimmin jyräyksen alkuvaiheessa ja hidastuvat jyräyskertojen lisääntyessä (kuva 20).



Kuva 20: Mallin vaikutus seulalle jääneen materiaalin määrään. (Sievi, kenttäkoe, määrittäissyvyys 0-5 cm, seulakoko # 32 mm)

### 1.6.1. Hienonemistulokset

Regressioyhtälöllä määritettiin kullakin seulalla tapahtunut materiaalmäärän muutos 24 jyräyskerran aikana. Lasketut muutokset on esitetty taulukossa 9. Syvyysrakkeeseen on merkitty pinta- (0-5 cm), keski- (5-10 cm) ja pohjanäytteet (10-15 cm). Taulukossa esiintyvä negatiivinen luku tarkoittaa sitä, että kyseisen raekoon seulalle jääneen materiaalin määrä pienenee jyräyskertojen lisääntyessä. Positiivinen luku merkitsee vastaavasti materiaalmäärän kasvua.



Taulukko 9: Materiaalimäärien erotus painoprosentteina seuloittain 24 jyräyskerran jälkeen ja ennen jyräystä

Kenttäkoe	Syvyys [cm]	# 0	# 0.074	# 0.125	# 0.250	# 0.500	# 1	# 2	# 4	# 8	# 16	# 32
Sievi	0-5	1.95	0.05	0.20	0.25	0.34	0.55	1.10	1.67	1.21	2.16	-9.47
Sievi	5-10	1.99	0.16	0.55	0.76	1.13	1.71	2.83	3.27	2.12	-10.11	-4.42
Sievi	10-15	0.85	0.12	0.37	0.52	1.11	1.62	1.84	1.44	-2.77	-1.82	-3.28
Nurmo	0-5	0.66	0.30	1.46	0.84	0.15	0.10	0.35	0.96	0.97	0.02	-5.81
Nurmo	5-10	1.86	0.11	-0.10	-0.08	-0.15	-0.14	-0.22	-0.21	-0.46	3.23	-3.84
Nurmo	10-15	0.66	0.05	1.08	0.61	0.09	0.08	0.16	0.70	0.04	2.44	-5.90
Laboratoriokoe	Syvyys [cm]	# 0	# 0.074	# 0.125	# 0.250	# 0.500	# 1	# 2	# 4	# 8	# 16	# 32
1. Nurmo	0-5	1.53	0.51	3.72	3.61	0.80	0.61	1.41	3.45	6.50	13.01	-35.14
1. Nurmo	5-10	5.18	-0.35	-4.53	-2.49	-0.46	-0.42	-0.47	-1.13	1.81	2.76	0.11
1. Nurmo	10-15	-0.57	-0.09	-0.25	-1.32	0.03	0.08	0.37	0.91	5.59	7.37	-7.26
2. Sievi	0-5	0.55	0.06	0.19	0.31	0.60	0.94	1.18	2.25	-3.59	-2.76	0.25
2. Sievi	5-10	1.13	0.10	0.38	0.43	0.92	1.51	2.36	1.89	1.25	-2.11	-7.87
2. Sievi	10-15	2.77	0.38	1.15	1.56	2.76	4.13	6.18	8.37	3.93	-1.45	-29.77
3. Sievi	0-5	3.49	0.22	0.50	0.81	1.48	2.18	3.28	4.08	4.47	-8.59	-11.91
3. Sievi	5-10	0.00	0.08	0.00	-0.13	0.11	-0.03	-0.58	-1.49	-2.52	10.34	-5.77
3. Sievi	10-15	3.86	-0.12	-0.54	-0.62	-0.79	-0.81	-0.61	-0.38	3.12	-3.23	0.11
4. Nurmo	0-5	0.65	0.69	0.36	0.78	0.00	0.03	0.03	0.24	1.15	-1.34	-2.59
4. Nurmo	5-10	-0.17	-0.71	-1.10	-1.00	-0.36	-0.22	-0.61	0.44	-1.64	3.38	2.01
4. Nurmo	10-15	0.63	0.11	1.82	0.40	0.45	0.18	0.72	1.63	1.98	3.31	-11.21
5. Jaara	0-5	0.33	0.14	0.16	0.20	0.28	0.40	0.78	2.19	2.09	-4.52	-2.04
5. Jaara	5-10	-0.72	0.04	-0.37	-0.38	-0.55	-0.73	-1.32	-2.16	-0.29	2.76	3.71
5. Jaara	10-15	0.07	0.01	0.02	-0.29	-0.31	-0.42	-0.31	-1.87	-2.43	4.32	1.19
6. Alakylä	0-5	2.85	0.46	1.59	1.23	2.13	2.98	3.63	3.75	-2.42	1.45	-17.65
6. Alakylä	5-10	1.02	0.28	0.59	0.91	0.87	0.73	0.79	-0.37	-1.39	0.48	-3.90
6. Alakylä	10-15	1.83	0.13	0.36	0.42	0.59	1.16	1.57	1.61	0.09	-6.96	-0.80
7. Nurmo	0-5	0.52	0.30	1.28	1.53	-0.14	-0.22	-1.13	-2.92	0.20	-2.22	2.79
7. Nurmo	5-10	-0.19	0.09	0.07	0.21	-0.63	-0.65	-1.87	-4.35	0.72	2.72	3.86
7. Nurmo	10-15	0.20	0.18	0.28	0.53	-0.05	-0.05	-0.13	0.46	2.77	-4.47	0.27
8. Sievi	0-5	-0.54	-0.09	-0.29	-0.86	-0.89	-1.49	-2.70	-0.88	1.73	10.35	-4.34
8. Sievi	5-10	-0.36	-0.08	-0.10	-0.29	-1.07	-2.07	-3.24	1.08	3.48	3.42	-0.77
8. Sievi	10-15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Materiaalit eivät hienontuneet kovinkaan merkittävästi. Osaksi tästä syystä materiaalien väliset hienonemiserot ovat vähäisiä. Hienonemisen kannalta kenttä- ja laboratoriokokeet eivät juurikaan eroa toisistaan.

Materiaalin hienoneminen on kohtalaisen selvä kenttäkokeessa. Suurimpien raekokojen (# 32, # 16) paino-osuudet pienenevät ja pienempien raekokojen (# 0, # 0.074) paino-osuudet kasvavat. Hienoneminen on suurinta lähimpänä pintaa olevassa kerroksessa. Laboratoriokokeen arvot ovat sensijaan epämääräisempiä.

Hienonemisen suuruutta määritettäessä ovat materiaalin ääripäiden seulakoot (# 0 ja # 32) tärkeitä. Seulontatappion eli raekoon # 0 materiaalin määrä ei voi vähentyä. Samoin suurimman raekoon seulalle jäänyt materiaali ei voi lisääntyä \*. Ääripään raekokojen materiaalimäärän muuttumista seuraamalla voidaan helposti päätellä, kuinka hyvin näytteen käsittely ja seulonta ovat onnistuneet ja kuinka hyvin käytetty menetelmä sopii kyseiseen tarkoitukseen.

Materiaalin epähomogeenisuus koekentässä ja toisaalta näytteen pieni koko aiheuttavat hienonemisen määrittämisessä ongelmia. Kentästä otettava näyte ei edusta tarkasti kentän raekokojakautumaa eli jokainen näyte poikkeaa toisestaan jonkin verran. Tästä syystä esimerkiksi Jaaran materiaalin keskikerroksen # 32 mm:n seulalle jäänyt osuus kasvaa 3.71 paino-% huolimatta kahdesta rinnakkaisnäytteestä, vaikka suurimman raekoon lisääntyminen ei ole mahdollista \*.

Edellä mainituista syistä tulosten keskiarvoistamista jatkettiin laskemalla eri syvyyksiltä määritettyjen tulosten keskiarvot ja yhdistämällä rinnakkaismateriaalien tulokset. Lopputuloksen kannalta ovat Jaaran, Nurmon suhteutetun ja Sievin suhteutetun materiaalin tulokset epävarmoja, koska niissä on selvät virheet seulakokojen # 0 ja # 32 materiaalimäärissä (taulukko 10).

Taulukko 10: Seulalle jääneen materiaalimäärän keskimääräinen muutos painoprosenteina

Kenttäkoe	# 0.000	# 0.074	# 0.125	# 0.25	# 0.5	# 1	# 2	# 4	# 8	# 16	# 32
Sievi K	1.60	0.11	0.37	0.51	0.86	1.29	1.93	2.13	0.19	-3.26	-5.72
Nurmo K	1.06	0.15	0.81	0.46	0.03	0.01	0.10	0.48	0.18	1.90	-5.18
Laboratoriokoe	# 0.000	# 0.074	# 0.125	# 0.25	# 0.5	# 1	# 2	# 4	# 8	# 16	# 32
Nurmo	1.21	0.03	0.00	0.00	0.08	0.04	0.24	0.92	2.57	4.75	-9.01
Sievi	1.97	0.12	0.28	0.39	0.85	1.32	1.97	2.45	1.11	-1.30	-9.16
Jaara **	-0.11	0.06	-0.06	-0.16	-0.19	-0.25	-0.28	-0.61	-0.21	0.85	0.95
Alakylä	1.90	0.29	0.84	0.85	1.20	1.62	2.00	1.66	-1.24	-1.68	-7.45
Nurmo S **	0.18	0.19	0.54	0.76	-0.27	-0.31	-1.04	-2.27	1.23	-1.32	2.31
Sievi S **	-0.45	-0.08	-0.20	-0.58	-0.98	-1.78	-2.97	0.10	2.60	6.89	-2.55

Jäljelle jääneiden materiaalien tuloksista muodostettiin neljä indeksiä. Kaksi selvintä indeksiä, jotka kuvaavat tämän vaiheen materiaalien hienonemista, ovat seulakokojen # 0 ja # 32 seulalle jäänyt materiaalimäärä. Kolmas tekijä on raekokoalueen # 0 - # 8 seulalle jääneen materiaalin summa ja neljäs tekijä raekokoalueen # 16 - # 64 seulalle jääneen materiaalin summa (taulukko 11).

\* Tässä oletetaan, että varisemista ei ole tapahtunut.  
\*\* Epätasaisesti käyttäytyvät tulokset



Taulukko 11. Materiaalien hienonemista kuvaavat indeksit (paino-%) kenttä- ja laboratoriokokeissa.

Kenttäkoe	Indeksi 1 # 0	Indeksi 2 # 32	Indeksi 3 # 0 - # 8	Indeksi 4 # 16 - # 64
Sievi	1.60	-5.72	8.79	-8.98
Nurmo	1.06	-5.18	3.10	-3.29
Laboratoriokoe	Indeksi 1 # 0	Indeksi 2 # 32	Indeksi 3 # 0 - # 8	Indeksi 4 # 16 - # 64
Sievi	1.97	-9.16	9.35	-10.46
Nurmo	1.21	-9.01	2.51	-4.27
Alakylä ***	1.90	-7.45	10.37	-9.13

Sievin materiaali näyttäisi olevan heikoin. Alakylän materiaali on lähes yhtä herkkää hienonemaan. Nurmon materiaali osoittautui tässä tapauksessa kestävimmäksi. Tällä tavalla kootut indeksit asettavat materiaalit keskenään samaan järjestykseen laboratorio- ja kenttäkokeissa. Lisäksi indeksien suurusluokka molemmissa kokeissa on samaa tasoa paitsi indeksin 2 osalta. Laboratoriomittakaavaisessa kokeessa hienonemat olivat hiukan suurempia kuin kenttäkokeessa, vaikka käytetty jyry oli selvästi pienempi.

### 1.6.2. Areometrianalyysit

Näytteistä, joiden jyryskerrat olivat 0 ja 24, tehtiin areometrianalyysit. Areometrianalyysin raekokojen paino-osuudet on määritetty suoraan kyseisen näytteen pesuseulontakäyrien avulla, eikä niihin ole sovellettu regressioanalyysiä. Tuloksiin vaikuttaa merkittävästi se, että areometritulokset skaalataan pesuseulonnasta saadun # 0.074 mm läpäisyprosentin perusteella. Tällöin mahdolliset pesuseulontatuloksissa esiintyvät virheet siirtyvät areometrituloksiinkin.

Alakylän materiaalissa fraktion <# 0.002 paino-osuus pienenee jyryskertojen myötä, mikä ei ole mahdollista. Muut areometritulokset ovat tässä suhteessa järkeviä.

Näytteenottosyvyys ei vaikuta selkeästi areometrituloksiin. Osassa tuloksia pintaosa (0-5 cm) hienonee eniten ja toisissa alaosa (10-15 cm). Tämä johtuu osaksi siitä, että näytettä otettaessa hienoinen pyrkii yleensä jäämään näytekuopan pohjalle, jolloin ylempään kerrokseen kuuluva hienoinen siirtyy osittain edustamaan alemmaa kerrosta.

\*\*\* Virheellinen tulos

Kenttäkokeissa Sievin materiaalin hienoaines lisääntyy vähemmän kuin Nurmon materiaalin hienoaines. Laboratoriokokeessa materiaalien järjestys on päinvastainen. Suhteutettujen ja suhteuttamattomien materiaalien välillä ei juurikaan ole eroja. Tietyn raekoon materiaalmäärä muuttuu vähemmän kuin yhden painoprosenttiyksikön (taulukko 12).

**Taulukko 12:** *Materialimäärien muutokset 0 ja 24 ylityskerran välillä. Taulukkoon on laskettu kolmen määrittäisyvyuden keskiarvotulokset.*

Kenttäkoe	# 0.000	# 0.002	# 0.006	# 0.020	# 0.074
Nurmo	0.35	0.29	0.62	0.49	0.11
Sievi	0.19	0.08	0.25	0.70	0.18
Laboratoriokoe	# 0.000	# 0.002	# 0.006	# 0.020	# 0.074
Nurmo	0.18	-0.13	0.15	0.05	0.09
Sievi	0.28	0.19	0.44	0.44	0.17
Sievi R	0.52	0.25	0.17	0.99	0.08
Nurmo R	0.29	-0.14	-0.18	0.28	-0.14
Jaara	0.21	-0.05	-0.10	0.01	0.03
Alakylä *	-0.39	0.42	0.99	1.21	0.31
Nurmo S	0.08	0.05	0.06	0.06	0.24
Sievi S	0.44	0.22	0.57	-1.29	0.00

Tampereella tehdyn sedigraphitutkimuksenkaan perusteella hienoaineksen raekokojakautumassa ei tapahdu merkittäviä muutoksia jyräyksen vaikutuksesta.

Ominaispinta-alan ja mineraalikoostumuksen määrittäminen tehtiin myös TTKK:ssa (liite 2). Kenttäkokeen 24 jyräyskerran jälkeen Nurmon näytteen kiilteen määrä (biotiitti) kasvaa ja samalla ominaispinta-ala kasvaa selvästi. Sievin osalta kiilteen (sarvivälke) lisääntyminen ei näy ominaispinta-alan muuttumisena.

Nurmon ja Sievin materiaaleille tehtiin Los Angeles -määrittäminen sekä käsittelemättömälle että jyrätylle materiaalille (24 ylitystä kenttäkoe, taulukko 13). Sievin materiaalilla puikkoisuus näyttäisi jyrättäessä pienenevän. Nurmon materiaalilla liuskeisuus ja puikkoisuus kasvavat. Tämä johtuu jyrätyn materiaalin rakeiden suuremmista pituus- ja leveysarvoista.

\* Virheellinen tulos

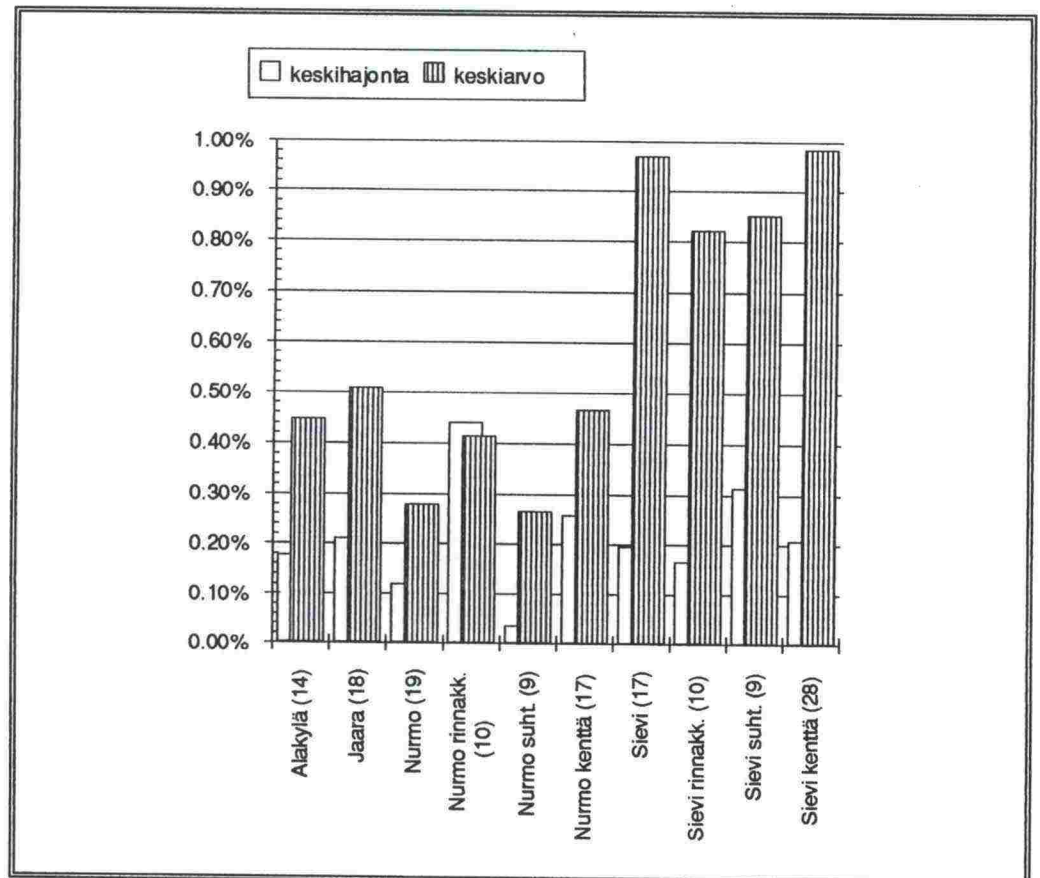


**Taulukko 13:** Jyräyksessä muuttuneet kiviainesominaisuudet. Käsittämätön ja kenttäkokeen jälkeinen (24 jyräyskertaa) materiaali

	Sievi 0	Sievi 24	Nurmo 0	Nurmo 24
Los Angelesluku	15.6	12.6	76.1	64.7
parannettu haurausarvo	12.5	11.0	48.8	46.5
hioutuvuusluku	1.57	1.59	6.10	5.30
muotoarvo 8-12 mm	2.545 / 1.623	2.345 / 1.667	2.334 / 1.610	2.472 / 1.752
muotoarvo 12-16 mm	2.514 / 1.643	2.548 / 1.694	2.487 / 1.753	2.595 / 1.826

### 1.6.3. Veden adsorptio

Veden adsorptionäytteitä tutkittiin laboratoriokokeesta 36 kpl ja kenttäkokeesta 24 kpl. Näytteet oli otettu ennen jyräystä ja 24 ylityksen jälkeen. Näytteiden raekoko oli alle 0.074 mm ja imeytymisaika 5 vrk. Adsorptio näyttäisi kasvavan lievästi jyräysten funktiona, mutta korrelaatio on heikko ( $r$  alle 0.3). Suuresta hajonnasta johtuen malleja ei esitetä. Kun yhdistetään adsorptiotulokset eri syvyyksiltä ja jyräyskerroilta materiaaleittain, saadaan *kuvan 21* tulos. Sievin murskeella adsorptioarvot ovat selvästi suurimmat. Muiden materiaalien välillä erot ovat pieniä.



**Kuva 21:** Veden adsorptio (% painosta). Keskiarvot ja keskihajonnat. Suluissa on ilmoitettu tutkittujen näytteiden määrä.

1.6.4. Kapillaarisuus

Kapillaarisuudet on esitetty taulukossa 14. Jyräysten lukumäärä ei vaikuttanut merkitsevästi kapillaarisuuteen eikä näytteenottosyvyys. Sievin materiaalilla kapillaarinen nousukorkeus oli suurin, yli 1 metrin. Muiden materiaalien väliset erot olivat pieniä. Tulos muistuttaa adsorptiokokeen tulosta (edellä).

Taulukko 14: Veden kapillaarinen nousukorkeus, m

Materiaali	Keskiarvo	Keskihajonta	Lukumäärä
Alakylä	0.78	0.32	9
Jaara	0.81	0.27	9
Nurmo	0.61	0.13	33
Sievi	1.10	0.32	28

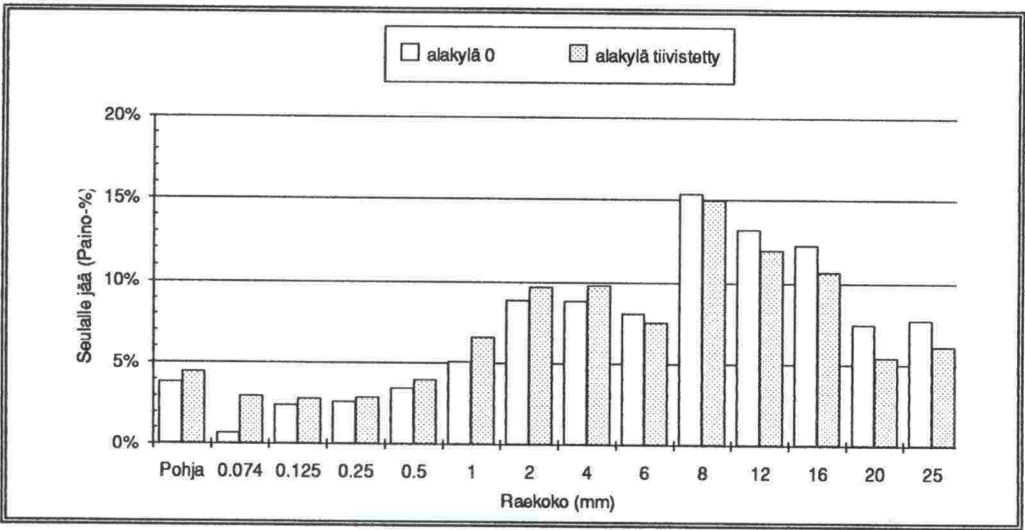
2. LABORATORIOTIIVISTYS

2.1. Proctor-kokeet

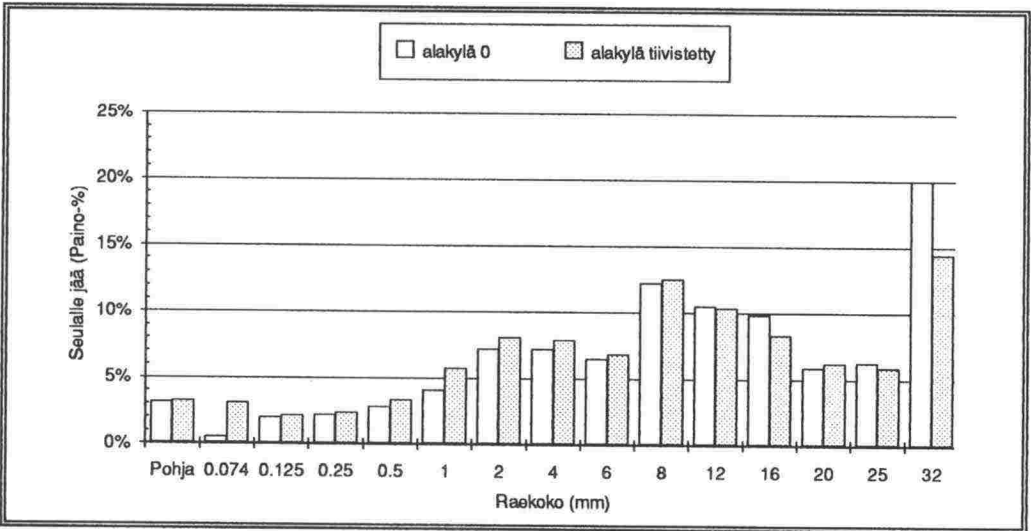
Aluksi kokeiltiin, onnistuisiko tiivistäminen 150 mm:n muotissa ilman, että maksimi-raekokoa pienennettäisiin (< # 64 mm). Kokeista ensimmäinen, Nurmo # 0 - # 64 epäonnistui. Syynä oli se, että materiaalia lensi pois muotista kun jokin isompi kivi sopivasti toimi vipuna. Sievin, Alakylän ja Jaaran materiaaleilla kokeet # 0 - # 64 tehtiin loppuun saakka.

Toisessa vaiheessa tutkittiin Proctor-tiivistämisen vaikutusta Nurmon, Sievin, Alakylän ja Jaaran murskeisiin alle # 32 mm:n lajitteen osalta. Raekokojakauma vastasi katkaistua keskiarvokäyrää. Kosteuksina käytettiin Proctor-kokeella aiemmin saatuja optimikosteuksia, jotka korjattiin näytteiden kivisyyksillä.

Tulokset osoittivat hienonemista, mutta joissakin tapauksissa hienoimman raekoon osuus pieneni tai suurinta raekokoa saatiin lisää, mikä ei ole mahdollista. Ongelmana on näytemäärän pieneneminen kokeen aikana, mikä johtuu siitä, että rakeita lentää muotista, kun näytettä tiivistetään. Korjaustoimeksi esitetään, että käytetään haurausarvon määritykseen kehitettyä laitetta Proctor-laitteen sijasta. Lisäksi tutkittava materiaali kootaan pesuseulotuista lajitteista (# 0.074 mm:n ylittävältä osalta pestynä, hienoaines lisätään kuivaseulottuna). Tehtyjen kokeiden tulokset ovat kuvissa 22, 23, 24, 25, 26, 27 ja 28.

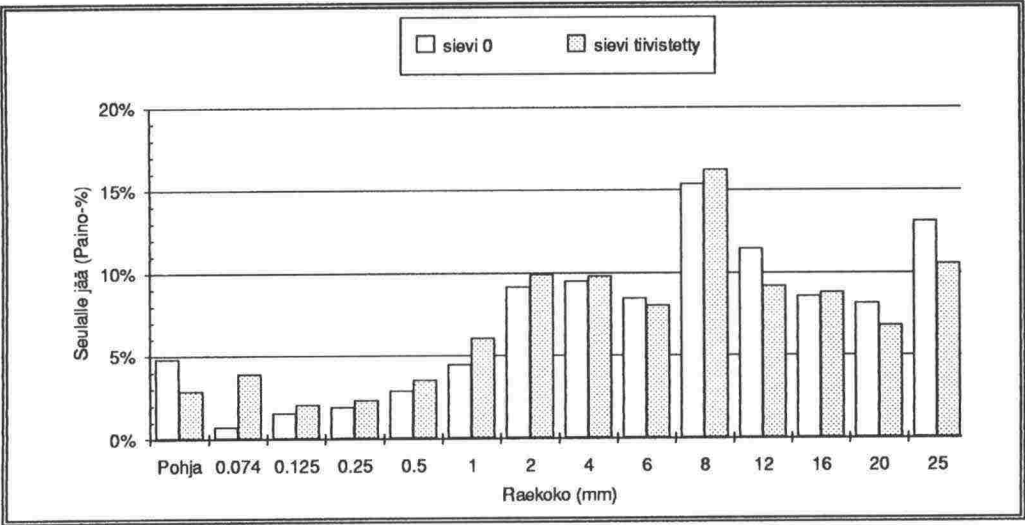


Kuva 22: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Alakylä # 0 - # 32 mm

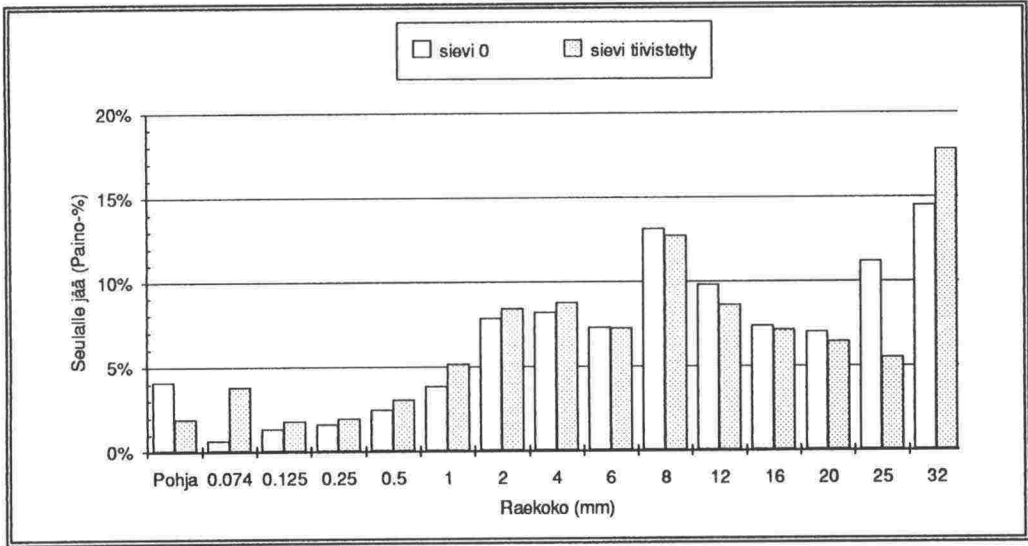


Kuva 23: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Alakylä # 0 - # 64 mm

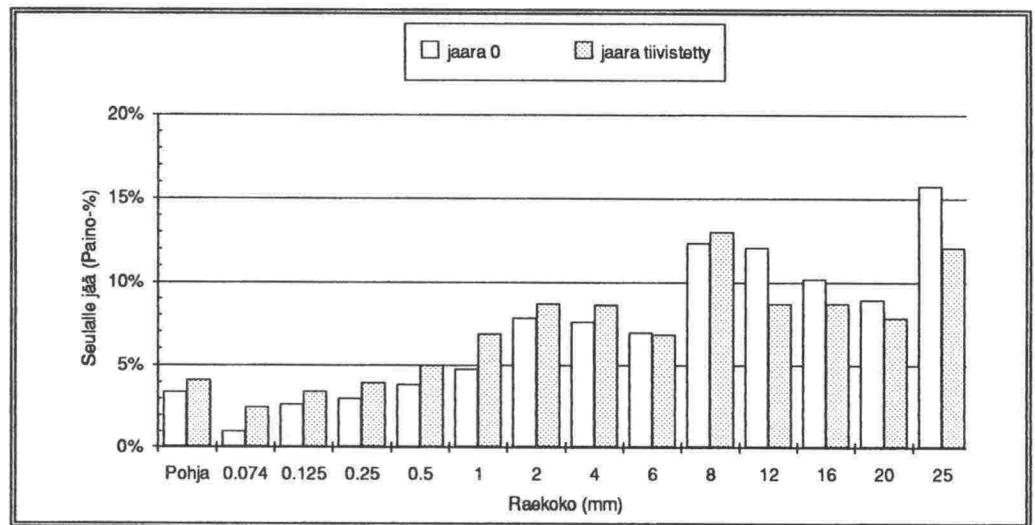




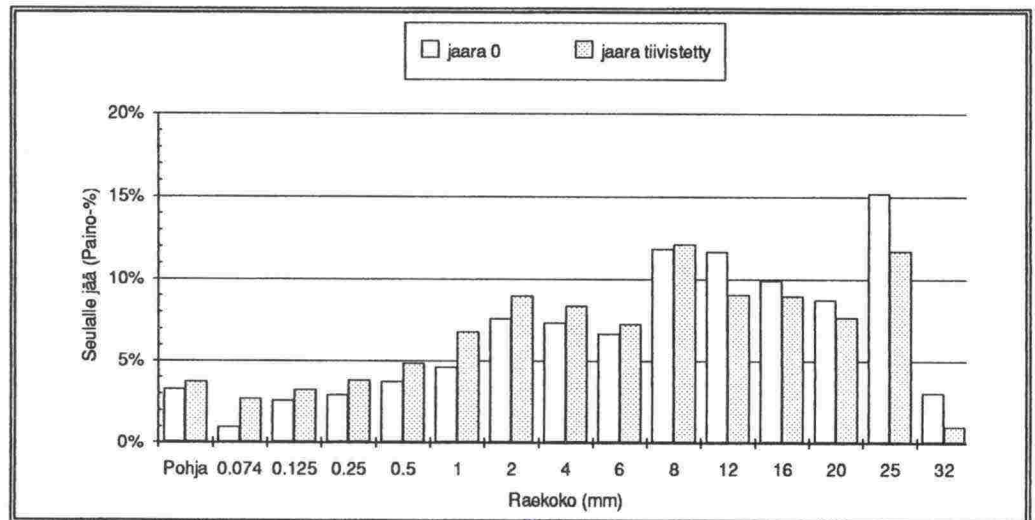
Kuva 24: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Sievi # 0 - # 32 mm.



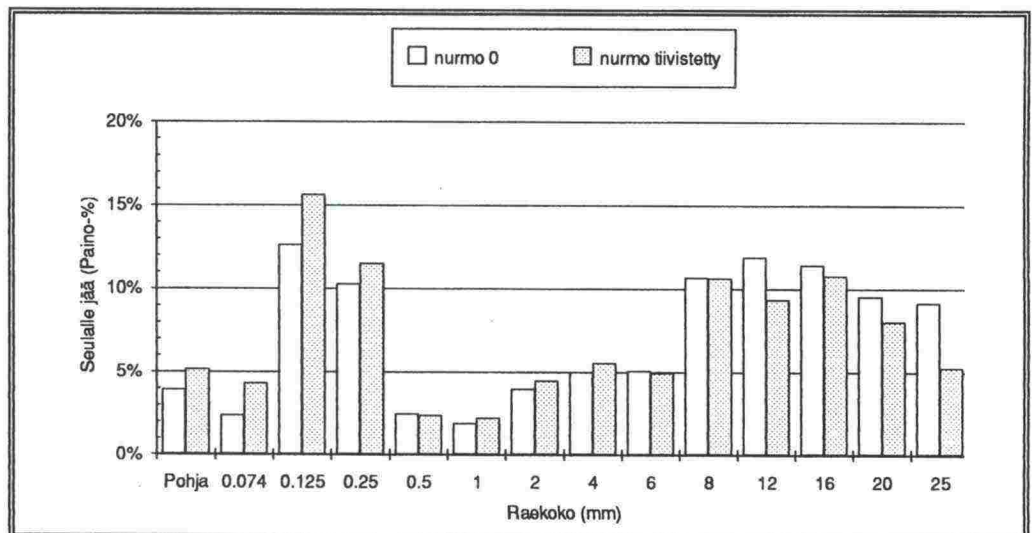
Kuva 25: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Sievi # 0 - # 64 mm



Kuva 26: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Jaara # 0 - # 32 mm



Kuva 27: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Jaara # 0 - # 64 mm



Kuva 28: Hienoneminen Proctor-kokeessa, Nurmo # 0 - # 32 mm

Sievin murskeen kohdalla seulalle jääneessä osuudessa tapahtuu suurimman rakekoon ja alle # 0.074 mm:n kohdalla muutos väärään suuntaan. Muutoin näyttäisi siltä, että yli # 8 mm:n rakeiden suhteelliset osuudet pienenevät ja alle # 6 mm:n rakeiden osuudet kasvavat. Rakekoon # 0.125 - # 0.075 mm osuus kasvaa huomattavasti kaikilla tutkituilla murskeilla.

Jaaran materiaali poikkesi muista # 0 - # 64 mm:n murskeista siten, että siinä oli suhteellisen vähän yli # 32 mm:n rakeita, mistä johtuen molemmat kokeet antoivat hyvin samanlaisen tuloksen. Kokeessa käytettävä energia oli riittävä myös rakeiden # 32 - # 64 mm rikkomiseen ja suurten rakeiden vaikutus läpäisyprosentteihin tuntuu lähinnä kahdessa seuraavassa seulakoossa.

## 2.2. IC-laitekokeet

### 2.2.1. Yleistä

IC-laitteen soveltuvuutta hienonemisen ja tiivistymisen ennustamiseen arvioitiin Jaaran, Nurmon ja Sievin materiaaleilla. Kustakin materiaalista seulottiin # 0 - # 16 mm raekokoalueen pestyt fraktiot ja ne suhteutettiin vastamaan alkuperäisiä materiaaleja. Näytemäärä oli kaikissa kokeissa sama 1730 grammaa (kuivapaino), joka Ø 103 mm:n muotissa tiivistettynä oli n. 100 mm. Näytteisiin lisättiin vesimäärä, joka vastasi kivisyydellä korjattuna proctor-kokeella saatua optimikosteutta. Kullakin materiaalilla tehtiin 400, 1000 ja 4000 kierroksen kokeet (Kolme identtistä näytettä). Työpaine kaikissa kokeissa oli 4.0 bar.

Testien tiedonkeruu tehtiin pääosin tietokoneella, jolloin saatiin tarkka tiheyden kehittyminen pyörityskertojen funktiona. Raekokomääritykset tehtiin pesuseulomalla näytteet testin päätyttyä.

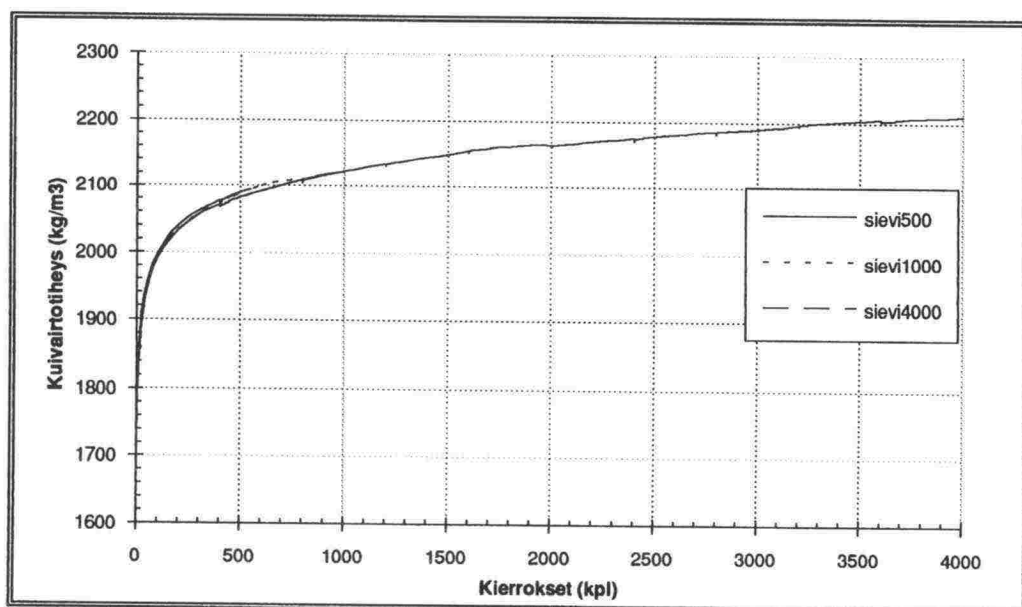
### 2.2.2. Tiivistyminen

IC-laitteella rinnakkaisnäytteille määritetyt tiheysarvot ovat samoilla kierrosmäärillä täsmälleen samoja, mistä voidaan päätellä, että IC-laitteella tehtyjen tiheysmittausten toistettavuus on erittäin hyvä (kuva 29).

Tiheys kasvaa alussa nopeasti hidastuen selvästi tietyllä, materiaalille ominaisella kierrosmäärällä. Tämä johtuu ilmeisesti osaksi siitä, että alkuvaiheessa rakeiden välissä on runsaasti tyhjää tilaa. Rakeet tukeutuvat toisiinsa pienten tukipintojen välityksellä, mikä helpottaa rakeiden murtumista.

Tiivistymisen edetessä huokostila pienenee ja rakeiden väliset kontaktipinnat kasvavat. Rakeiden murtuminen edellyttäisi entistä suurempia voimia ja jännityksiä materiaalissa. Voima pysyy kuitenkin vakiona, mistä syystä rakeiden murtuminen vähenee ja tiivistyminen hidastuu.

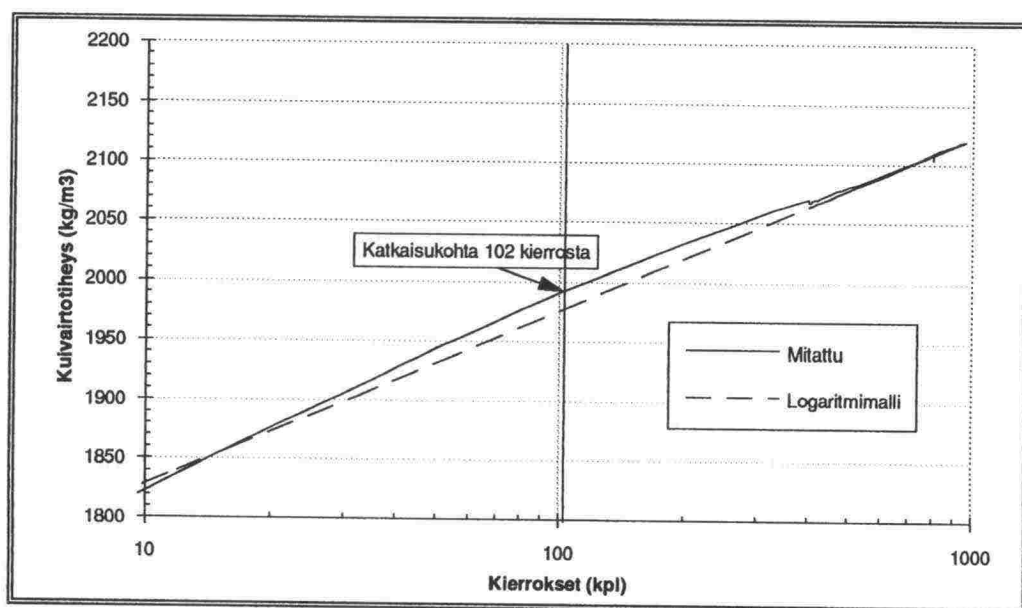




Kuva 29: Tiheyden kasvu IC-laitekokeessa Sievin materiaalilla

Tiheyden kehittymistä ei voi kuvata yhdellä asymptoottikäyrällä kuten kenttä- ja laboratoriokokeessa, johtuen tiheyden voimakkaasta kaarevuuden muutoksesta. Sitä varten tiivistymiskäyrä jaettiin kahteen osaan.

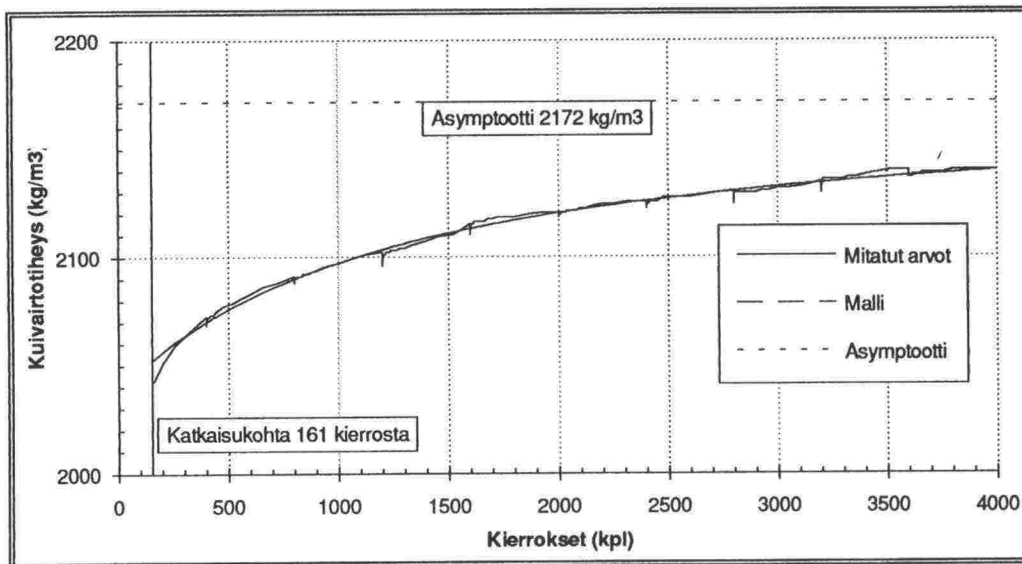
Piste, josta tiivistymiskäyrä katkaistaan, etsitään käytännössä seuravaalla tavalla. Muodostetaan tiivistymisen logaritmiyhtälö kierrosten suhteen ja lasketaan suurin erotus mitatun ja logaritmiyhtälöstä saadun arvon välillä. Saatua pistettä on katkaisukohta (kuva 30).



Kuva 30: Tiivistymiskäyrän katkaisukohdan määrittäminen Sievin materiaalilla

Kun tiivistymiskäyrä on katkaistu, voidaan käyrän yläosaa käsitellä aiemmin esitetyllä tavalla (kaava 3). Tiheydet kasvavat koko ajan eikä käyrällä ole huippua. Toisin sanoen materiaalin yht'äkkistä löyhtymistä ei tapahdu vielä 4000 kierroksen jälkeen.

Ylemmän arvoalueen asymptoottikäyrät vastaavat erittäin hyvin mitattuja tiivistymiskäyriä, mistä syystä asymptootti-malli sopii hyvin kuvaamaan materiaalin tiivistymistä IC-laitteessa. Mallin avulla voidaan määrittää saavutettava maksimi- ja 95%-tiiviudet (kuva 31).



Kuva 31: Nurmon materiaalin asymptoottinen tiivistymiskäyrä kierrosalueen 161 - 4000 mukaan

IC-laitteella tehdyn testin mukaan Nurmon materiaalin maksimi tiheys on 2172 kg/m³. Vastaavasti kenttä- ja laboratoriokokeessa 10 cm syvyydeltä Troxler-laitteella määritetyt maksimi tiheydet ovat 2228-2248 kg/m³. IC-laitteella määritetty tiheys vastaa Nurmon suhteutetulla materiaalilla määritettyä maksimitiheyttä (taulukko 15).

Taulukko 15: Tiivistymisyhtälön regressioparametrit, selitysasteet, iterointivakiot, 95%-tiheydet ja 95%-tiheyteen vaadittavat kierrokset sekä katkaisukohdat

IC-laitte	A	B (kg/m³)	R	V	$n_{0.95}$ (kpl)	$p_{95\%}$ (kg/m³)	Katkaisukohta (kpl)
Nurmo	-166845	2172	99.35%	1242	294	2063	161
Sievi	-298764	2264	99.39%	1101	1538	2151	102
Jaara	-167336	2146	96.46%	401	1159	2038	405 *

Sievin materiaalin Troxler-laitteella määritetyt maksimitiheydet ovat kenttä- ja laboratoriokokeessa 2122 - 2156 kg/m³ ja vastaava IC-laitteella määritetty tiheys on

\* Katkaisukohtaa ei määritetty erikseen, koska tiedonkeruu toimi vasta 405 kierroksen jälkeen.

2264 kg/m<sup>3</sup>. Myös Sievin tapauksessa IC-laitteen tulos vastaa paremmin suhteutettua materiaalin maksimitiheyttä (2177 kg/m<sup>3</sup>) kenttäolosuhteissa.

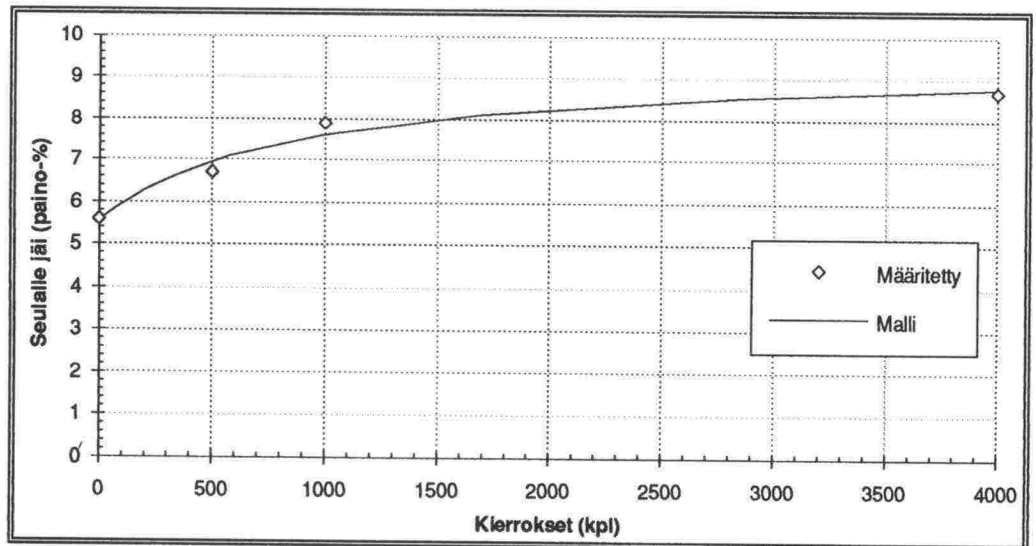
Jaaran materiaalin IC-laitteella määritetty maksimitiheys on 2146 kg/m<sup>3</sup> ja vastaa-vasti Troxler-laitteella määritetty maksimitiheys 2060 kg/m<sup>3</sup>. Jaaran materiaalin asymptoottikäyrä on IC-laitteella tehdyissä kokeissa on laskettu vasta 405 kierroksesta eteenpäin, sillä tiedon keruu ei toiminut alkuvaiheessa.

IC-laitteella tehdyissä kokeissa maksimiraekoko oli # 16 mm. Tällä saattaa olla vaikutusta siihen, että tulokset eivät ole täysin rinnastettavissa kenttä- ja laboratorio-kokeisiin.

### 2.2.3. Hienoneminen

Koemateriaaleista tehdyt näytteet seulottiin ja suhteutettiin vastaamaan tarkoin alkuperäistä materiaalia. Vähäisten muutosten takia näytteen eri fraktioiden painosuukien tarkka tunteminen on välttämätöntä.

Materiaalit hienonevat selvästi IC-laitteella. Hienoneminen on alkuvaiheessa nopeampaa ja se hidastuu kierrosten lisääntyessä. Kunkin raekoon materiaalimäärä määritettiin asymptoottimallin avulla (kuva 32). Mallista saatujen ja alkuperäisten painosuukien suurin ero oli 0.87 ja eron keskihajonta 0.14 painoprosenttiyksikköä.



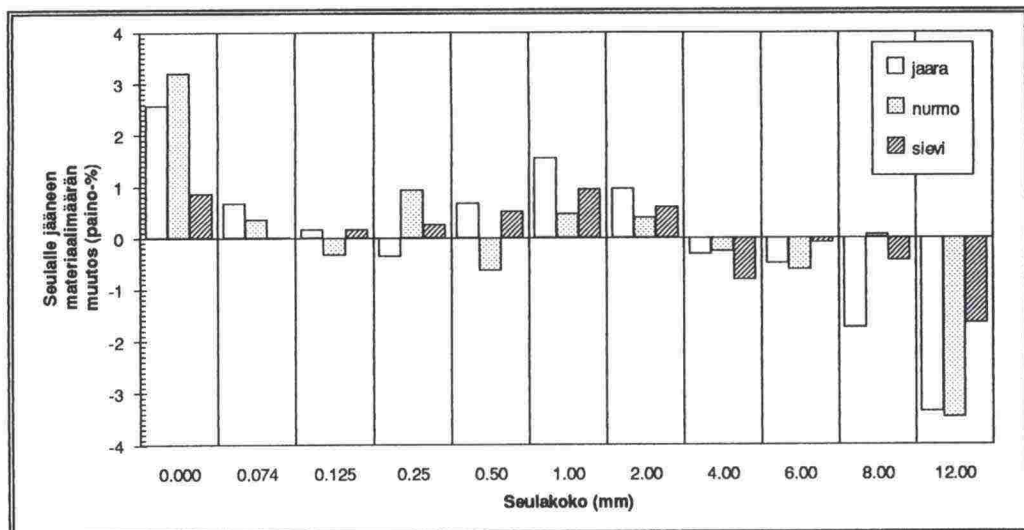
Kuva 32: Seulontatappion suuruus eri kierroksilla. (Nurmo, < # 0.074)

IC-laitetta varten tehdyt suhteutukset ja seulonnat onnistuivat erittäin hyvin, sillä väääränsuuntaista # 12 mm jakeen painosuuden kasvua tai # 0 mm jakeen painosuuden vähentymistä ei esiintynyt.

Hienonemisen tarkastelua varten määritettiin viisi indeksiä. Pienimmän raekoon eli seulontatappion kasvu ja suurimman raekoon pieneneminen ovat selkeimmät muutokset 0. ja 4000. kierroksen välillä. Kolmas selkeä muutos tapahtuu raekoko-



alueella # 4 - # 16, jossa materiaalimäärä vähenee. Neljäs indeksi on # 0 - # 0.125 mm alueella tapahtuva materiaalimäärän kasvu. Viides muutos tapahtuu raekoko-alueella # 0.125 - # 4 mm, jossa muutos tutkituilla materiaaleilla on keskimäärin kasvava vaikkakaan se ei ole täysin säännöllinen (kuva 33).



Kuva 33: Materiaalimäärien muutokset IC-laitteella tehdyissä testeissä

Paino-osuuksien muutoksiin perustuvat indeksit on esitetty taulukossa 16. Indeksit on laskettu suoraan kyseisten raekokojen paino-osuuksien muutosten summana. Indeksit 1, 2 ja 4 korreloivat keskenään eri materiaaleilla. Tästä voidaan päätellä, että edellä olevasta kolmesta indeksistä voidaan rajoittua tarkastelemaan ainoastaan yhtä indeksia.

Taulukko 16: Materiaalien hienonemista kuvaavat indeksit IC-laitteella tehdyn kokeen mukaan

Materiaali	Indeksi 1 # 0	Indeksi 2 # 12	Indeksi 3 # 4 - # 16	Indeksi 4 # 0 - # 0.125	Indeksi 5 # 0.125 - # 4
jaara	2.57	-3.37	-5.95	3.24	2.99
nurmo	3.21	-3.47	-4.31	3.57	0.83
sievi	0.86	-1.67	-3.03	0.88	2.49

Nurmon materiaali on heikoin eli se hienonee eniten kaikkien muiden indeksien paitsi indeksin 5 perusteella. Tämä johtuu siitä, että materiaalin raekoostumus on poikkeuksellinen. Vähiten hienoni Sievin materiaali. Jaaran materiaali on lähes yhtä herkkä hienonemaan kuin Nurmon materiaali.

### 3. YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU

#### 3.1. Päätulokset

Tutkimus osoitti, että tiheys kasvaa säännöllisesti tiivistämiskertojen funktiona. Tiivistettävän kerroksen pintaosa tiivistyy nopeammin ja tiiviimmäksi kuin alemmat osat. Troxler-laite on käyttökelpoinen tiiviydentarkkailuväline, jonka tarkkuus ja toistettavuus ovat hyviä. Mittauksia varten kannattaa asentaa mittausputki, jolloin tiheys voidaan määrittää koko tiivistettävän rakenteen vahvuudelta. Samalla saadaan luotettavammat tulokset kuin pintamittauksella.

Tutkimuksessa muodostettiin menetelmä, jonka avulla voidaan määrittää tarvittava jyräskertamäärä suoraan todellisesta rakenteesta. Menetelmä on nopea ja luotettava, koska se huomioi kaikki tiivistymiseen vaikuttavat tekijät. Menetelmässä tiiviyttä mitataan radiometrisellä laitteella suoramittauksena aina samasta kohdasta kerrosta häiritsemättä.

Tässä kokeessa käytetyt materiaalit eivät hienontuneet kovinkaan merkittävästi. Koejyräysohjeen mukaisesti tehty tiivistäminen ei juurikaan huononna materiaalin ominaisuuksia. Materiaali hienonee eniten tiivistämisen alkuvaiheessa ja hienoneminen hidastuu tiivistystyön edetessä. Tämä todettiin sekä kenttä- että laboratorio-määrittelyissä. Hienonemista voidaan arvioida pelkkien pesuseulontatulosten avulla, sillä hienoainekselle tehdyt testit eivät osoittaneet merkittäviä muutoksia sen ominaisuuksissa (kapillaarisuus, veden adsorptio).

Kevyemmän laboratoriojyrän aikaansaama hienoneminen ja tiivistyminen olivat verrannollisia raskaamman jyrän vastaaviin arvoihin. Kevyemmällä jyrällä tehtyjen kokeiden hienonema ja maksimi tiheys olivat joissain tapauksissa jopa hiukan suurempia kuin raskaammalla jyrällä. Tulokset olisivat todennäköisesti skaalattavissa yhteen myös siinä tapauksessa, että käytössä olisi huomattavasti pienempi jyrä.

Laboratoriotestit ja kenttämittaukset eivät suoraan vastaa toisiaan. Ero johtunee laboratoriotestilaitteissa olevasta joustamattomasta alustasta.

Tulosten tarkastelussa pyrittiin mallintamaan tiivistymistä ja hienonemista laboratoriotestien perusteella. Seuraavassa esitettävät kaavat 9 - 15 määritettiin ainoastaan siitä syystä, että löydettäisiin tiivistymiseen ja hienonemiseen eniten vaikuttavat tekijät. Kaavoja ei missään olosuhteissa tule käyttää tiivistymisen tai hienonemisen matemaattiseen määrittämiseen.

#### 3.2. Tiivistyminen

Tiivistymistä voidaan tarkimmin seurata rakentamiskohteessa tehtävillä Troxler-laitemittauksilla. Jotta materiaalin käyttäytymistä voitaisiin arvioida ennen rakennusvaihetta, pyrittiin seuraavaksi selvittämään, voidaanko materiaalin tiivistymiskäyttäminen ennustaa pelkkien laboratoriomääritysten perusteella.

Kentällä ja toisaalta laboratoriossa määritettyjen tiheyksien välinen korrelaatiokerroin oli Proctor-kokeen osalta -0.34 ja IC-kokeen -0.17. Runsaasti hienoainesta sisältävä materiaali tiivistyy parhaiten kenttäkokeissa kun taas laboratoriolaitteilla tehdyissä kokeissa runsas hienoaineksen määrä pienentää saavutettavia tiheyksiä. Tähän vaikuttaa se, että kentällä tapahtuva tiivistys tehdään joustavan alusrakenteen päällä ja laboratoriolaitteissa tiivistämisalusta on aina kova.

Heikkoa riippuvuutta parannettiin ottamalla analyysiin mukaan useampia selittäviä tekijöitä. Malleissa ei käytetä vakiotekijää. Selitettävänä muuttujana oli Troxler-laitteella määritetty 95%-tiiviys ( $\rho_{0.95}$ ) ja selittävinä tekijöinä olivat:

- kiviainesominaisuudet (taulukko 2)
- IC-laitteella määritetyt tiheydet ja hienonemisindeksit (taulukot 15 ja 16)
- Proctor-kokeessa määritetyt tiheydet ja hienonemisindeksit (kuvat 22, 24, 26 ja 28)
- kenttä- ja laboratorioskokeissa määritetyt hienonemisindeksit (taulukko 11)
- läpäisyprosenttien raekoot  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  ja  $d_{90}$
- raekäyrän muotoa kuvaavat tunnusluvut  $k$  ja  $k'$  (kaavat 7 ja 8)

$$k = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} * d_{10}} \quad (7)$$

$$k' = \frac{(d_{50})^2}{d_{90} * d_{10}} \quad (8)$$

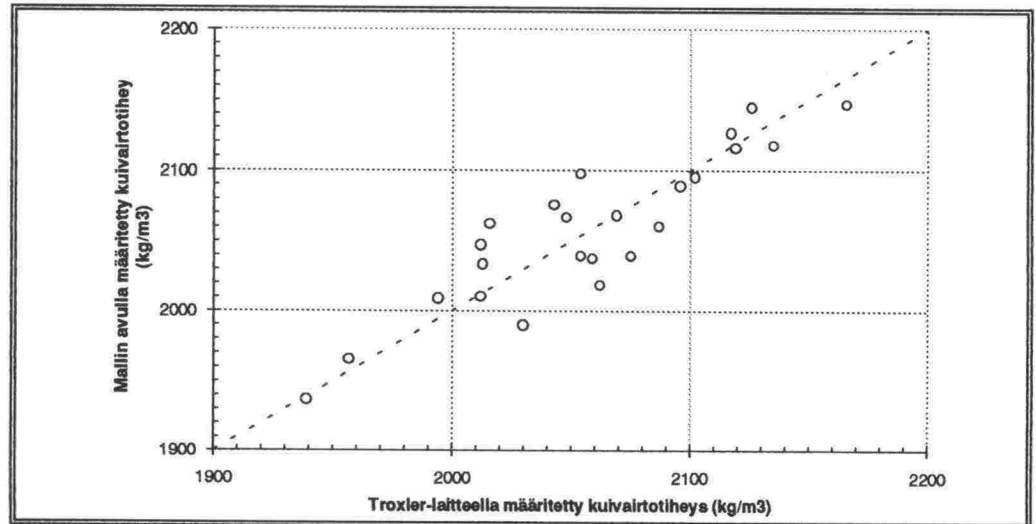
Tapausten lukumäärä 34 on pienehkö tilastolliseen käsittelyyn. Lisäksi esimerkiksi kiviainesominaisuuksien määritykset on tehty vain perusmateriaaleille (4 materiaalia), mikä saattaa osaltaan heikentää tulosten luotettavuutta. Toisaalta eri määritysten laatua on arvioitu jo niiden muodostamisen aikana ja tuloksista on poistettu selvästi virheelliset arvot. Malliksi saatiin *yhtälö 9*.

$$\rho_{Trox0.95} = 0.75 * \rho_{kiinto} + 5.05 * k' - 5.77 * h \quad (9)$$

missä  $\rho_{Trox0.95}$  = 95% tiheys Troxler-laitteella ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_{kiinto}$  = kiintotiheys ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $h$  = määrittävyys (cm)

Mallin keskivirhe  $27 \text{ kg/m}^3$ , selitysaste on 79% ja tapausten lukumäärä 24. Mallissa kiintotiheyden luotettavuus on suurin. Materiaali, jossa on roikkuva raekäyrä, tiivistyy kenttäolosuhteissa hyvin. Määrittävyvyyden merkitys on erittäin selvä, mikä todettiin tiivistymiskäyriä tarkasteltaessa. Määrityksessä ei käytetty pintamittauksiin perustuvaa tiheysmittaustietoa, sillä se on epäsäännöllistä (kuva 34).





Kuva 34: Tiheyden määrittäminen laboratorikokeisiin perustuvan mallin avulla

Edellisessä mallissa selittävät tekijät on valittu tilastollisten tunnuslukujen perusteella. IC-laitteella määritettyjen tiheyksien toistettavuus on erittäin hyvä. Lisäksi tiivistymisen kehittymistä voidaan seurata tarkasti. Tästä syystä seuraavaan malliin valittiin perustekijäksi IC-laitteen avulla määritetty 95%-tiheys. Tällöin malli noudattaa yhtälöä 10.

$$\rho_{Trox_{0.95}} = 0.96 \cdot \rho_{IC_{0.95}} + 31.60 \cdot \Delta_{Hioutuvuus} - 5.87 \cdot h \quad (10)$$

missä  $\rho_{IC_{0.95}}$  = 95%-tiheys IC-laitteella ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\Delta_{Hioutuvuus}$  = hioutuvuus

Mallin keskivirhe  $29 \text{ kg/m}^3$ , selitysaste on 78% ja tapausten lukumäärä 22. Helposti hioutuva materiaali tiivistyy paremmin kuin sitkeä. Määrittäissyvyys on tekijänä myös tässä yhtälössä ja syvyyden kerroin on samaa suuruusluokkaa kuin yhtälössä 9.

Kolmannessa tiivistymismallissa käytetään päätekijänä Proctor-kokeessa saatuja optimitiheyksiä. Malli on noudattaa yhtälöä 11.

$$\rho_{Trox_{0.95}} = 0.21 \cdot \rho_{Proctor} + 5.41 \cdot k' + 0.56 \cdot \rho_{Kiinto} \quad (11)$$

missä  $\rho_{Proctor}$  = Proctor-kokeessa määritetty optimitiheys ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_{Kiinto}$  = kiintotiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

Mallin keskivirhe on  $35 \text{ kg/m}^3$ , selitysaste on 65% ja tapausten lukumäärä 24. Mallin kertoimet ovat epämääräisiä eikä kertoimien suuruusluokka ole selitettävissä. Merkitsevyydeltään heikoin muuttuja yhtälössä 11 on juuri Proctor-optimitiheys.

Muuttujien korrelaatiomatriisi on esitetty liitteessä 3. Syvyys ei luonnollisesti korreloi laisinkaan laboratoriotestien tulosten kanssa. IC-laitteella ja Proctor-kokeella määritetyt tiheydet korreloivat hyvin keskenään. Sen sijaan kumpikaan edellisistä ei kor-

reloi kenttämittausten kanssa. Kiintotiheys korreloi jonkin verran IC-laitteella määritetyn tiheyden kanssa mutta ei Proctor-optimitiheyden kanssa. Raekäyrän tunnusluku  $k'$  ei korreloi kiintotiheyden kanssa.

Tiivistymismallissa tulee olla ilmeisesti mukana yksi laboratoriossa määritetty tiivistymistä tai tiheyttä kuvaava tekijä, yksi raekäyrää tai sen muotoa kuvaava tekijä, yksi kiviaineksen lujuustekijä ja tiheyden määrittävyys. Se, mikä tekijä kustakin pääluokasta valitaan, tulisi päätellä enemmän tutkittavia materiaaleja sisältävän tutkimuksen puitteissa. Näillä muuttujien pääluokilla päästänee kohtuullisen lähelle kenttäolosuhteissa saavutettavaa 95%-tiheyttä.

### 3.3. Hienoneminen

Hienonemisen selvittäminen osoittautui vaikeaksi. Ongelmana oli näytteenottomenetelmän soveltumattomuus tarkkoihin määrittäyksiin. Jatkossa menetelmää on kehitettävä, jotta saataisiin luotettavampia tuloksia. Samalla voidaan ehkä vähentää rinnakkaisnäytteiden lukumäärää ja sitä kautta työtä.

Edellä mainitusta huolimatta pyrittiin hienonemista selvittämään hienonemisindeksien 1 (seulontatappio) ja 2 (raekoko #32) perusteella, koska näiden indeksien luotettavuus on helposti todettavissa. Selittävinä tekijöinä käytettiin samoja muuttujia, kuin tiivistymisen määrittämisessä sekä mineraaliominaisuuksia.

Seulontatappion lisääntyminen selittyy parhaiten *kaavalla 12*. Yhtälössä käytetään perustekijänä IC-laitteella määritettyä hienonemisindeksiä 1.

$$INDI_{jyvä} = -1.62 * INDI_{IC} + 6.93 * 10^{-4} * k' + 0.12 * Kvartsi \quad (12)$$

missä  $INDI_{IC}$  = IC-laitteella määritetty hienonemisindeksi 1 (%)

$Kvartsi$  = kvartsi-mineraalin osuus materiaalissa (%)

Mallin keskivirhe 0.0045, selitysaste 65% ja tapausten lukumäärä 7. IC-indeksin kerroin on negatiivinen. Raekäyrän epäjatkuvuus ja kvartsin määrä lisäävät hienonemista.

*Yhtälössä 13* käytetään pakotettuna tekijänä Proctor-kokeessa määritettyä hienonemisindeksiä 1.

$$INDI_{jyvä} = -1.49 * INDI_{Proctor} + 0.0022 * D_{60} - 0.0025 * k \quad (13)$$

missä  $INDI_{Proctor}$  = Proctor-kokeessa määritetty hienonemisindeksi 1 (%)

$D_{60}$  = läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko (mm)

Mallin keskivirhe 0.0010, selitysaste 93% ja tapausten lukumäärä 5. Yhtälön merkitsevin tekijä on  $D_{60}$ . Virheellisten tapausten poistamisen jälkeen erilaisia Proctor-indeksejä jäi ainoastaan 2 kappaletta. Tulos on tämän takia vääristynyt.

Suurimman raekoon seuralle jääneen materiaalmäärän muutoksia selittää parhaiten yhtälö 14.

$$IND2_{jyrä} = -5.86 * IND2_{IC} - 0.0079 * D_{60} - 0.0050 * k' \quad (14)$$

missä  $IND2_{Jyrä}$  = kenttäkokeen hienonemisindeksi 2 (%)  
 $IND2_{IC}$  = IC-latteella määritetty hienonemisindeksi 2 (%)

Mallin keskivirhe on 0.016, selitysaste 82% ja tapausten lukumäärä 7. IC-laitteella määritetyn suurimman raekoon hienoneman kasvaessa pienenee kentällä määritetty hienonema. Hienonema kasvaa, kun läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko kasvaa ja läpäisykäyrä muuttuu epäjatkuvaksi.

Proctor-kokeessa määritetty suurimman raekoon hienonema selittää käänteisesti maastossa tapahtuvaa hienonemista (kaava 15).

$$IND2_{jyrä} = -0.49 * IND2_{Proctor} - 0.0086 * D_{60} + 3.45 * 10^{-5} * B_{IC} \quad (15)$$

missä  $B_{IC}$  = IC-laitteella määritetty maksimitiheys ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $IND2_{Proctor}$  = Proctor-kokeessa määritetty hienonemisindeksi 2 (%)

Keskivirhe on 0.018, selitysaste 80% ja tapausten lukumäärä 7. Vaikka tunnusluvut ovat kohtuullisia, vaikuttaa Proctor-testin tulos käänteisesti hienonemiseen kentällä. Raekoko vaikuttaa samalla tavalla, kuin kaavassa 14. IC-laitteella määritetty suuri maksimitiheys pienentää hienonemista kentällä.



## 4. TIIVISTÄMISTUTKIMUKSEN JATKAMINEN

### 4.1. Yleistä

Tiivistämistutkimusta on suunniteltu jatkettavaksi varsinaisella tutkimuksella. Oskilloivan jyran käyttämistä harkittiin jo esitutkimusvaiheessa. Jatkotutkimusten suunnittelua silmälläpitäen esitellään periaatteelliset erot täryjyran ja oskilloivan jyran välillä sekä eri tyyppisiä jyrien tiivistysmittareita. Lopuksi kuvataan tarkemmin Troxler-laitteelle kehiteltyä mitta-putkea.

### 4.2. Jatkotutkimukset

#### 4.2.1. Perusteet tutkimuksen jatkamiselle

Käsillä olevassa tutkimuksessa paljastui runsaasti sekä laitteisiin että materiaaleihin liittyviä seikkoja, joiden avulla voidaan arvioida kalliomurskeiden tiivistymistä. Materiaalille tehtävien laboratoriotutkimusten määrää voidaan vähentää keskittymällä vain tiivistymisen ja hienonemisen kannalta merkityksellisiin kokeisiin. Kenttämittauksia voidaan vähentää niiden tarkkuutta parantamalla. Esitutkimuksessa saatuja tuloksia tulisi testata laajemmalla aineistolla, minkä jälkeen niitä voitaisiin hyödyntää tiivistystyön laadunvalvonnassa ja materiaalien kelpoisuuden toteamisessa.

Tässä vaiheessa katsotaan seuraavat tutkimukset tarpeellisiksi:

- ATK-sovellutuksen laatiminen
- oskilloivan ja perinteisen täryjyran vertailu
- kenttäsovellutus
- laboratorioskokeet
- urituslaiteskokeet

Laboratorioskokeiden käyttökelpoisuutta tiivistymisen ja hienonemisen ennustamiseen selvitetään rinnan sekä täryjyrien vertailun että kenttäsovellutuksen kanssa. Tutkimusten sisältöä ja tavoitteita kuvataan erikseen jäljempänä.

Ensimmäisenä tehtäen ATK-sovellutus ja sitä hyödyntävä kenttäsovellus. Tähän liittyvillä laboratorioskokeilla pyritään tarkentamaan luotuja malleja ja etsimään sopiva menetelmä tiiviyden tavoitetason määrittämiseen. Oskilloivan ja perinteisen täryjyran vertailu ja urituslaiteskokeet voidaan erottaa erillisiksi tutkimuskokonaisuuksiksi ja nekin pyritään käynnistämään mahdollisimman pian. Urituslaitteen testausvaihe alkaa Oulun yliopistossa jo kesällä -93.

#### 4.2.2. Atk-Sovellutus

##### Perustelut ja tavoitteet

Tiivistymisen kehittymistä kuvaavan asymptoottimallin käyttäminen tiivistystyön seurannassa vaatii työläitä laskutoimituksia, joten tietokoneohjelma on välttämätön edellytys menetelmän hyödyntämiselle.

##### Tutkimuksen toteutus

Tehdään helppokäyttöinen DOS-ympäristössä toimiva ohjelma, joka laskee saavutettavan maksimitiheyden (95%tiheys) ja tarvittavan jyräskertamäärän Troxler-laitteen avulla tehtävistä mittauksista.

##### Tulosten potentiaaliset hyödyt

Menetelmän nopeus ja tarkkuus saadaan hyödynnettyä työmaatasolla. Tuloksesta on työkalu, jota voidaan käyttää laadunvarmistuksessa ja työn ohjauksessa. Talletettu mittaustieto on myös helposti käytettävissä myöhempiä tutkimuksia varten.

##### Resurssit

Ohjelmointi ja testaus vaatii 3-4 htkk.

#### 4.2.3. Oskilloivan ja perinteisen täryjyrän vertailu

##### Perustelut ja tavoitteet

Oletetaan, että tiivistyminen kohdistuu oskilloivalla jyrällä paremmin kuin perinteisellä täryjyrällä juuri tiivistettävään kerrokseen. Seurataan tiivistymistä ja hienonemista.

##### Tutkimuksen toteutus

Kenttäkokeet tehdään liikenteeltä suljetulla alueella sekä normaalilla tiehankkeella. Kokeissa tutkitaan myös jyrrien tiiviysmittareita.

##### Tulosten potentiaaliset hyödyt

Jos oskilloiva jyrä osoittautuu käyttökelpoiseksi, on mahdollista parantaa rakentamisen laatua tiivistämisen osalta.

##### Resurssit

Työhön arvioidaan kuluva 8 htkk.

#### 4.2.4. Kenttäsovellutus

##### Perustelut ja tavoitteet

Tavoitteena on saattaa tiivistystutkimus osaksi normaalia laadunvalvontaa.

##### Tutkimuksen toteutus

Normaaleilla rakentamishankkeilla useassa tiepiirissä kokeillaan kehitettyä mittausputkea ja asymptoottimenetelmää tavanomaisen laadunvalvonnan ohella.

##### Tulosten potentiaaliset hyödyt

Laadunvalvonnan kehittäminen.

##### Resurssit

Tiepiiri tekee mittaukset. Tutkimuslaitos laatii tiiviysmittausohjeet, käsittelee tulokset ja tekee raportin. Tutkimuslaitoksen osalta resursseja tarvitaan 4-5 htkk.

#### 4.2.5. Laboratoriokokeet

##### Perustelut ja tavoitteet

Pyritään selvittämään materiaalien laadun vaikutus tiivistymiseen ja hienonemiseen.

##### Tutkimuksen toteutus

Oskilloivan ja perinteisen täryjyrän tutkimuksen sekä kenttäsovellutuksen yhteydessä käytettävillä materiaaleilla tehdään laboratoriokokeita (IC, Proctor, sovellettu haurausarvokoe)

##### Tulosten potentiaaliset hyödyt

Mahdollistaa materiaalien käyttäytymisen ja käyttökelpoisuuden toteamisen ennakkoon laboratoriomenetelmillä.

##### Resurssit

Laboratoriokokeisiin tarvitaan 4 htkk.



#### 4.2.6. Urituslaitetekokeet

##### Perustelut ja tavoitteet

Selvitetään urituslaitteen soveltuvuus kalliomurskerakenteen pysyvien muodonmuutosominaisuuksien ja valmiissa tiessä tapahtuvan hienoneman todentamiseen. Em. asioista nykyinen tietämys puuttuu. Lisäksi selvitetään työnäikainen tiiviystaso, johon pyritään, jotta muodonmuutokset valmiissa tierakenteessa olisivat mahdollisimman pienet.

##### Tutkimuksen toteutus

Koeratakokeet urituslaitteella.

##### Tulosten potentiaaliset hyödyt

Perustietämys em. asioista on välttämätöntä, kun halutaan kehittää mitoitusmenetelmiä ja asettaa materiaalivaatimuksia kerrosten toiminnallisten ominaisuuksien perusteella.

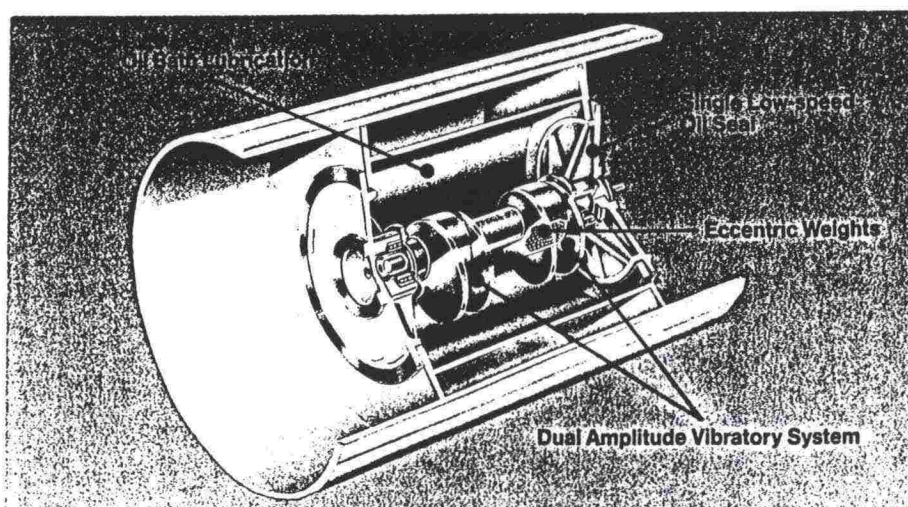
##### Resurssit

Urituslaitteen käyttökelpoisuuden testaus 6 htkk.

### 4.3. Tärjyjrä ja oskilloiva jyrä

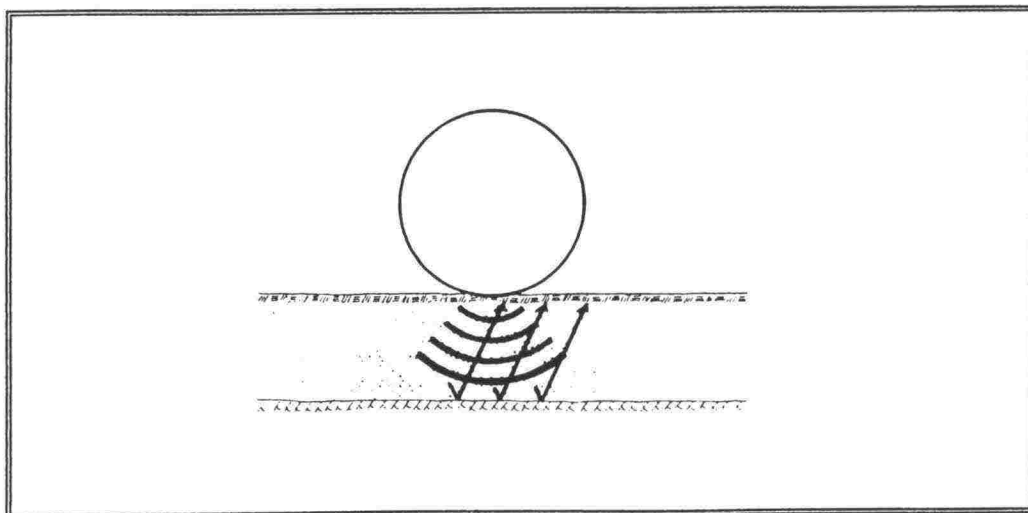
#### 4.3.1. Tärjyjrä

Tärjyjrässä epäkesko on laakeroitu kiertämään valssin akselin ympäri. Amplitudin muutos tehdään jyrämallista riippuen eri tavalla. Periaate on aina se, että pyörivän massan painopisteen etäisyys muuttuu (kuva 35). Eräissä jyrissä epäkeskon pyörimissuunta muuttuu ajosuunnan muuttuessa (CAT).



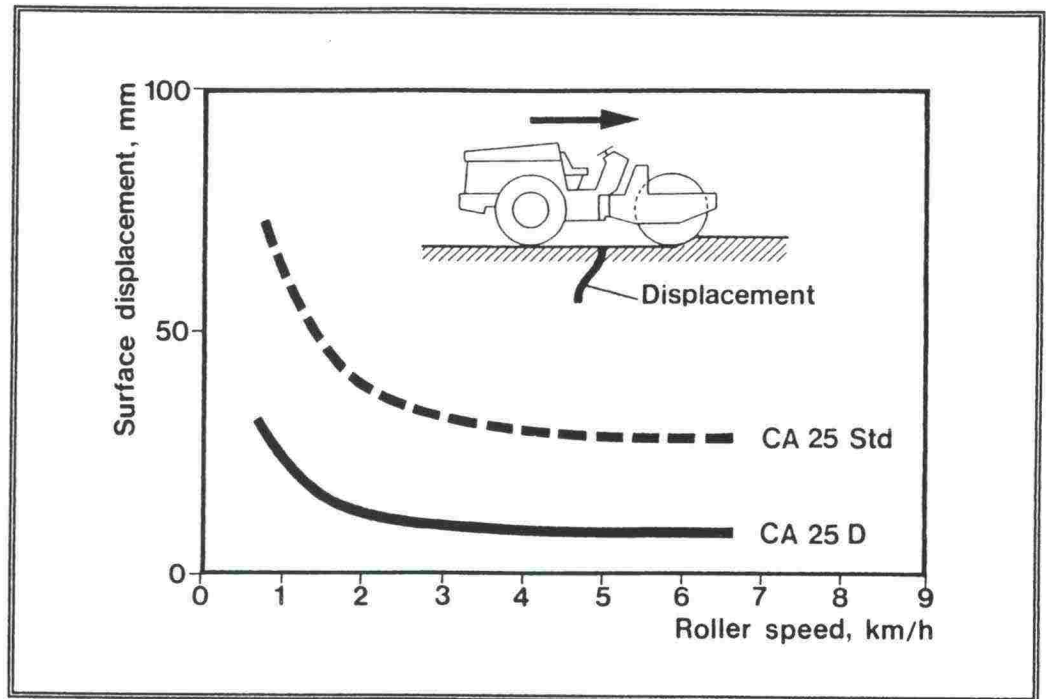
Kuva 35: Tärjyjrän epäkeskot (Cat)

Jyrät rakennetaan niin, että keskipakoisvoimat ovat pienempiä kuin jyrän valssille tuleva staattinen paino. Kun tiivistettävän kerroksen jäykkyys kasvaa, alkaa jyrän valssi ajoittain irrota maasta. Valssin hyppiminen on epäsäännöllistä ja tuloksena on ylijyräys, joka vähentää tiiveyttä (kuva 36). Löyhtyminen ilmeisesti rajoittuu tiivistettävän kerroksen yläosaan, eikä sitä helposti havaita, koska alemmat kerrokset voivat edelleen tiivistyä /9,29/.



Kuva 36: Ylijyräys /9/

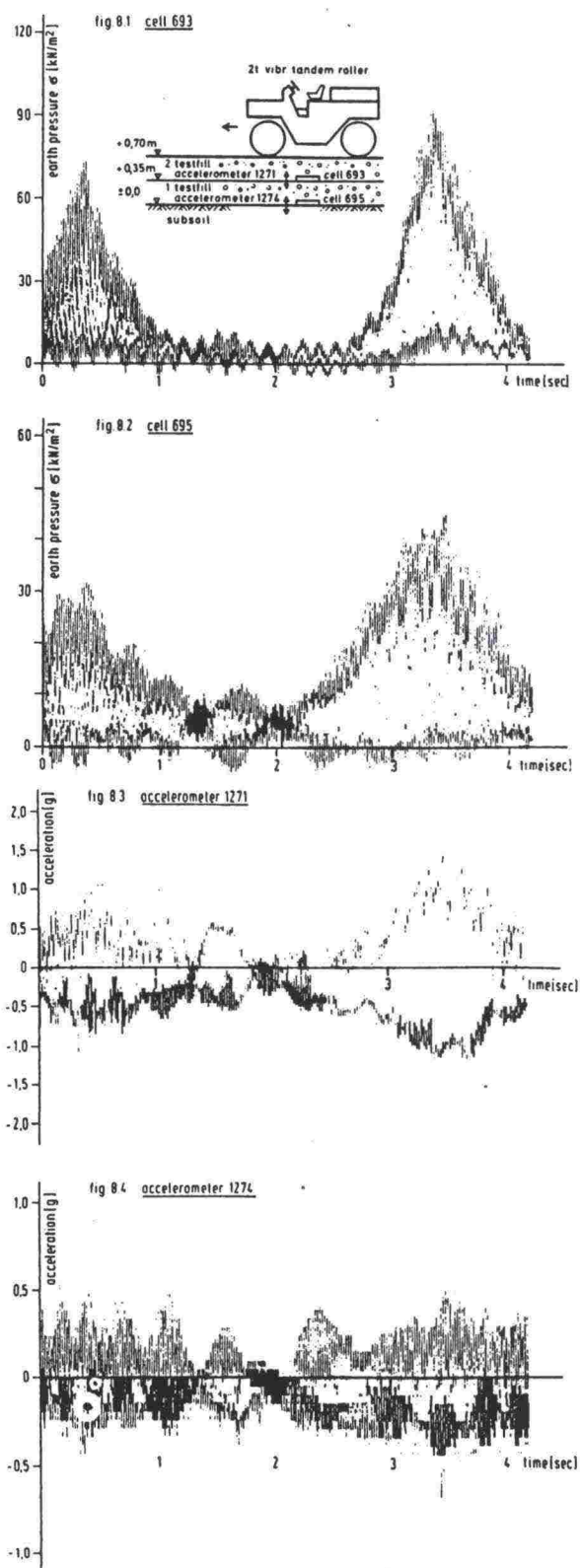
Jyrättäessä tapahtuu pintakerroksessa vaakasiirtymää, jonka suuruus riippuu täryjyrällä ajonopeudesta ja valssin vetotavasta (kuva 37). Tällä muokkautumisella lienee merkitystä pintakerrosten hienonemista ajatellen, jos kiviaines on helposti hioutuvaa. (Vastaavanlaista silminnähtävää siirtymistä havaittiin tekemässämme laboratoriokokeessa ensimmäisillä ylityskerroilla, vaikka jyrässä molemmat valssit olivat sekä vetäviä että täryttäviä. Syynä oli ilmeisesti laatikon reunan läheisyys ja kehitymätön leikkauslujuus, sillä kenttäkokeessa siirtyminen ei ollut niin selvää).



Kuva 37: Maan pinnasta mitattu vaakasiirtymä kahdella täryjyrällä. Alempi käyrä liittyy jyrään, jossa valssi on vetävä /9/.

Jyrättäessä paine keskittyy valssin alle ja jakautuu syvyyden myötä laajemmalle alalle. Kiihtyvyysoimat ovat jakautuneet melko tasaisesti jo pintakerroksissa (kuva 38) /8/. Jyrä oli samaa tyyppiä kuin käyttämämme laboratoriokokeen jyrä eli molemmissa valsseissa oli tärytys. Tiivistyskapasiteetti kasvaa kun täryvalsseja on yhden sijasta kaksi, sillä tarvittavat ylityskerrat vähenevät. Lisäys on noin 80% maa-aineksilla ja noin 50% asfaltilla /9/. Täryjyrän vaikutussyvyys on kuitenkin verrannollinen jyrän painoon ja se voi ulottua jopa 2 metriin.

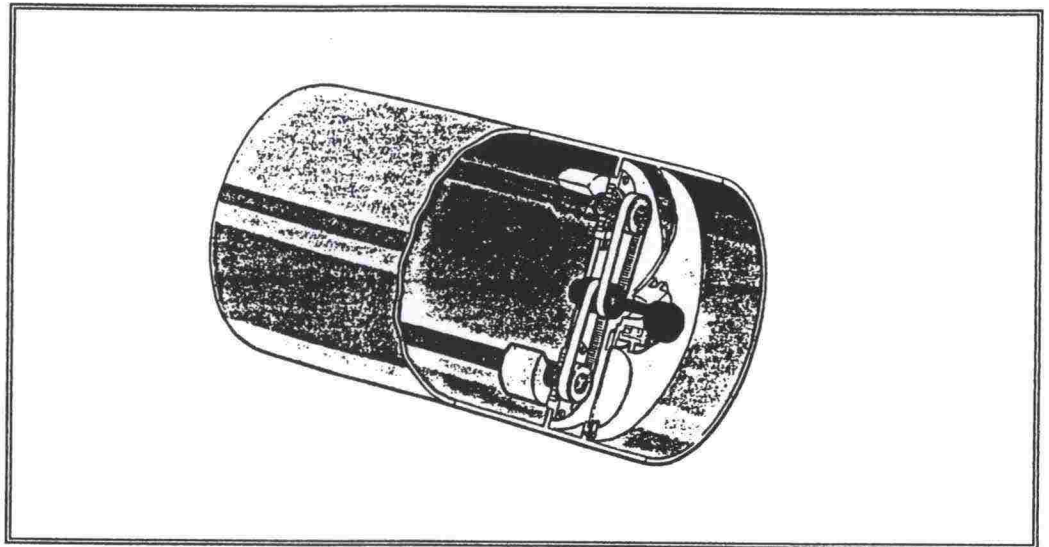




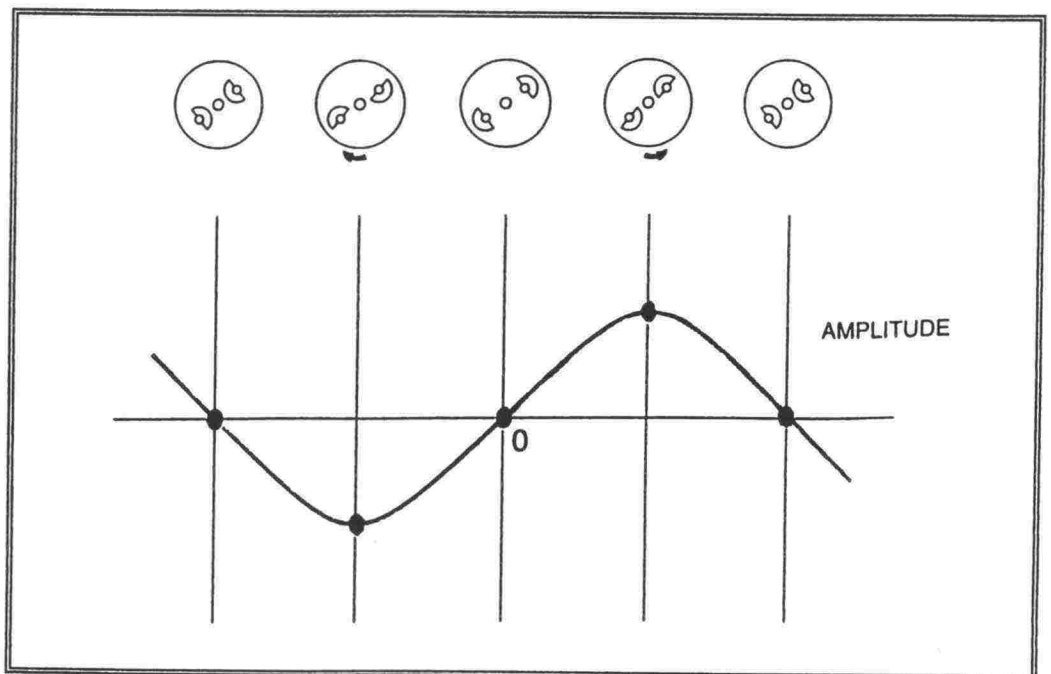
Kuva 38: Paine ja kiihtyvyys maassa 35 ja 70 cm:n syvyydessä. Jyräys 2 tonnin täräjäjyrällä Dynapac CC10

#### 4.3.2. Oskilloiva jyrä

Oskilloivassa jyrässä on kaksi täryakselia, jotka on laakeroitu valssin pätyyn sen vastakkaisille reunoille (kuva 39). Epäkeskot pyörivät samalla nopeudella siten, että ne ovat aina vastakkaisilla puolilla (kuva 40). Liike saa aikaan voimaparin, joka pyrkii pyörittämään valssin kehää vuoroin eteen, vuoroin taaksepäin (kuva 41).



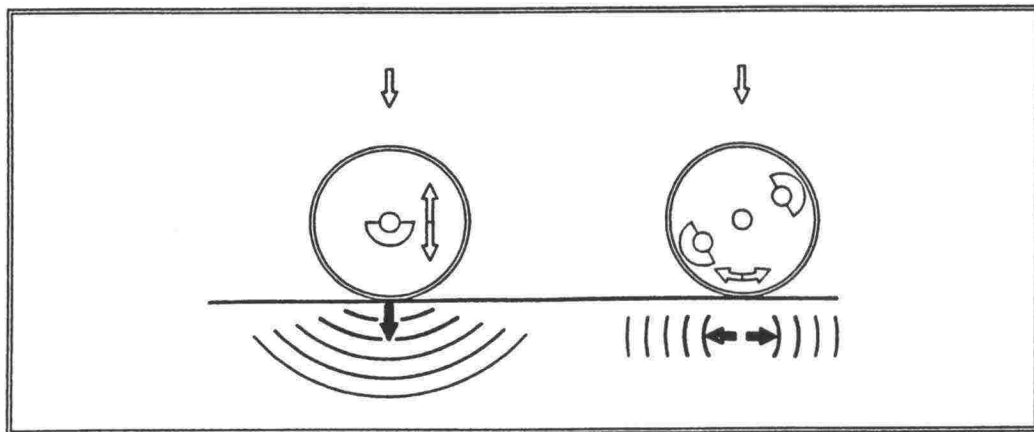
Kuva 39: Oskilloivan jyrän epäkeskojen sijoitus (Hamm)



Kuva 40: Oskilloivan värähtelyn periaate

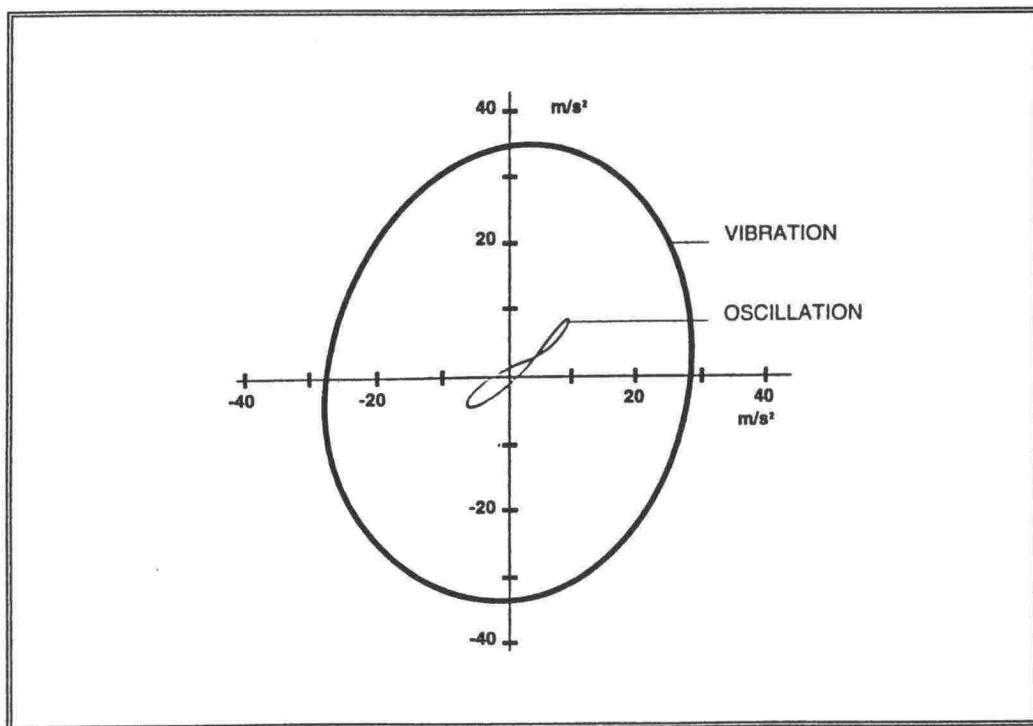
Täryjyrän toiminta perustuu iskuvaikutukseen. Oskilloivaa jyrää käytettäessä tiivistettävään kerrokseen syntyy pystysuuntaisten voimien lisäksi vaakasuuntaisia leikkausvoimia. Tärinää siirtyy oskilloivasta jyrästä vähemmän sivusuuntaan kuin täryvalssista, mistä syystä sitä voidaan käyttää lähellä rakennuksia. Koska iskua ei

tapahdu, valssi pysyy koko ajan maassa. Hienoneminen lienee ainakin kovilla ja haurailta kiviaineksilla vähäisempää kuin täryjyrällä tiivistettäessä.



Kuva 41: Täryvalssi ja oskilloiva valssi

Kiihtyvyys valssin akselilta mitattuna on selvästi erilainen oskilloivalla ja täryvalsilla (kuva 42). Kuvassa ensimmäiset asteikkomerkit vastaavat putoamiskiihtyvyyttä ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Kiihtyvyysoimalla ei yksin ole merkitystä tiivistämistehoon (laakereiden rasituksiin sillä on suuri vaikutus). Kiihtyvyysoimien suuruus ja varsinkin suunta on oleellinen asia silloin kun tarkastellaan erityyppisiin jyriin asennettavia tiiviysmittareita.



Kuva 42: Vertailu täryvalssin ja oskilloivan valssin kiihtyvyyksistä

Oskilloivaa jyrää on Keski-Suomen, Vaasan ja Lapin tiepiireissä tutkinut tekn. Puranen (Oskilloiva täryjyrä. Keski-Suomen tiepiirin sisäisiä julkaisuja 1/92).



Suomessa Hammin oskilloivia jyriä on 6 kpl (27.11.92):

Urak. Jänkälä, Rovaniemi,	2410 SD0
Urak. Romunen, Pieksämäki	2410 SD0
Urak. Björkrot, Kokkola	2410 SD0
Lemminkäinen, Oulu	DV 60
Valtatie/Ekström, Helsinki	DV 60
Lahden kaupunki/Ekström	2415 SD0

Jyrissä on Hamm-tiiveysmittarit ja maahantuoja vuokraa taltioivia CDS-laitteita.

#### 4.4. Jyriin liitettävät tiivistysmittarit

##### 4.4.1. Yleistä

Valssin liikkuvaan osaan kiinnitettävä sensori mittaa jatkuvasti liikettä (kiihtyvyyksiä). Signaali käsitellään keskusyksikössä ja tulos näytetään tiivistysarvona. Lukema on suhteellinen arvo, joka kasvaa alustan jäykkyyden kasvaessa ja kuvaa alustan kantavuutta. Lukemaan vaikuttaa jyrän ajonopeus, ajosuunta ja täryn/heilahduksen taajuus. Syvyysvaikutus riippuu jyrän tyypistä ja koosta sekä tiivistettävän materiaalin ominaisuuksista.

Kun tiivistysmittarin lukemiin liitetään samanhetkinen matkatieto, saadaan tiivistystyön kirjausjärjestelmä, joita on monella valmistajalla. Tietoja voidaan katsella joko jyrässä olevalla yksiköllä, paperitulostuksena tai mittaustiedot voidaan siirtää pc:lle jatkokäsittelyä varten.

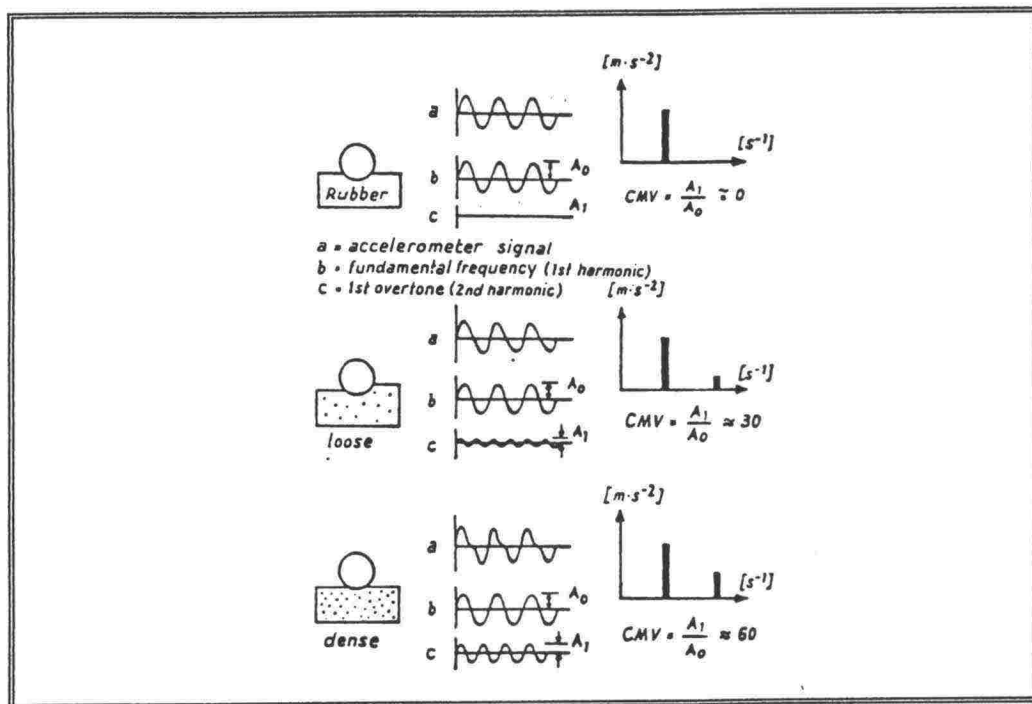
##### 4.4.2. Mittausperiaate

Täry saadaan aikaan epäkeskolla, joka pyörii valssin painopisteakselin ympäri. Keskipakoisvoiman ja hitausvoimien tasapaino saa aikaan harmonisen sinivärähtelyn silloin kun valssi on täysin kimmoisella alustalla tai kun se on joustavasti kiinnitetty. Valssin dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttaa jyrän perustaajuus ja maaperän kimmoisuus.

Kiihtyvyyssanturi, joka on kiinteässä yhteydessä valssiin, rekisteröi jatkuvasti värähtelystä johtuvaa kiihtyvyyden pystysuoraa komponenttia (Compactometer). Kiihtyvyyssanturi asennetaan pystysuoraan rummun akselin yläpuolelle täryjyrissä ja vaakasuoraan rummun akselin korkeudelle oskilloivissa jyrissä (Casen CDS = Compactometer).

Alkujaan harmoninen siniaalto vääristyy maaperän vastuksen mukaan. Fourier-analyysillä voidaan värähtelystä erottaa ylitaajuuDET, jotka ovat perustaajuuden kerrannaisia ( $\omega = 2\pi f$ ). Ensimmäinen ylitaajuus kuvastaa maaperän värähtelyä. Seuraaviin ylitaajuuksiin vaikuttavat laakeriäänet, riittämättömästi vaimennetut jyrän osat jne.

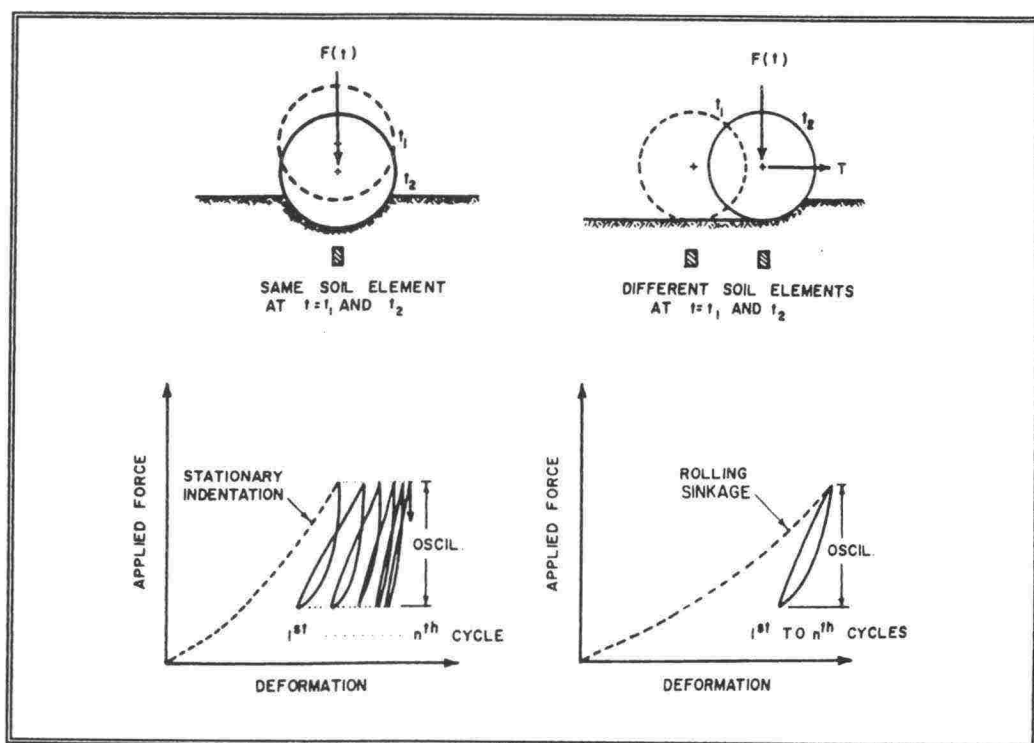
Suodattamalla saadaan selville perustaajuus ja sen ensimmäinen yläääni. Yliäänen ja perustaajuuden amplitudien suhteita lasketaan ja kerätään muistiin 200 ms:n välein. Tuloksena ilmoitettava CMV on ennalta määrättyin välein (1-100 s) tulostettava keskiarvo näistä suhteista. CMV on paljas luku, joka kuvastaa tiivistystilaa kuljetulla matkalla (kuva 43).



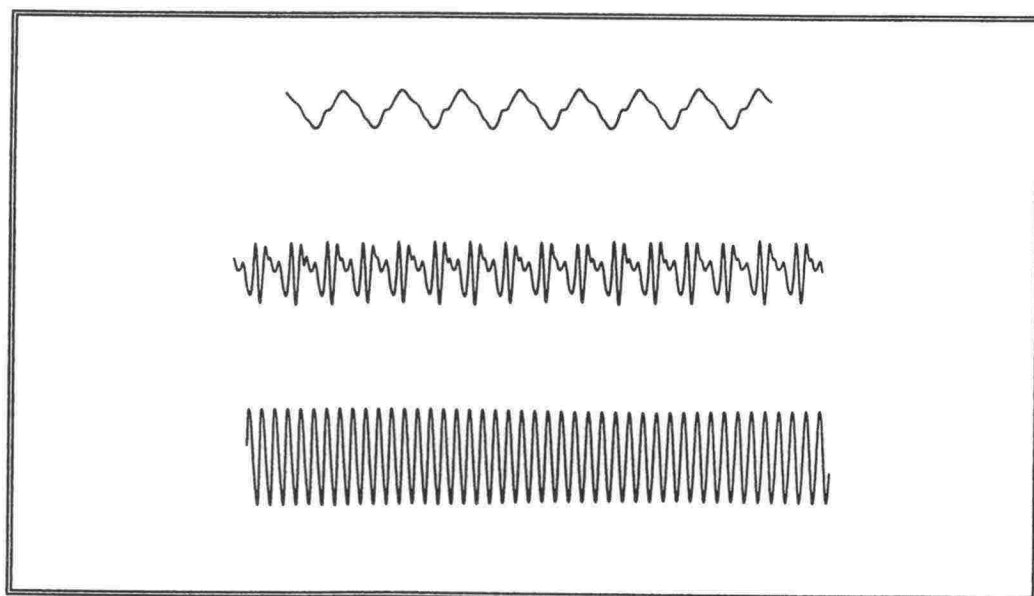
Kuva 43: CMV-arvon laskeminen (Compactometer) /8/

Jyrän nopeus vaikuttaa suuresti tuloksiin, mistä syystä se olisi pidettävä vakiona. Alhaisilla nopeuksilla saadaan korkeita lukemia ja päinvastoin. Yleisesti maan ominaisuuksien (kimmoisuuden tai vaimennuksen) tarkka mittaaminen liukuvalla mittauksella on ongelmallista, koska mittaus ei kohdistu samoihin maa-alkioihin (kuva 44) /9/.

Täryjyää voidaan käyttää mittauksiin, jos se on dynaamisesti stabiili eli se ei värähtelee pituusakselinsa ympäri, vaimennuksen rungon ja valssin välillä tulee olla hyvä ja laakerien hyvässä kunnossa. Jos vapaasti tuettuna saatu kiihtyvyyssanturin signaali ei ole puhdas siniaalto, CMV-arvoksi rekisteröityy jokin nolasta poikkeava arvo, joka voi olla mielivaltaisen pieni tai mielivaltaisen suuri (kuva 45) /8/.



Kuva 44: Voiman ja muodonmuutoksen suhde, kun jyrä on paikallaan ja kun jyrä liikkuu



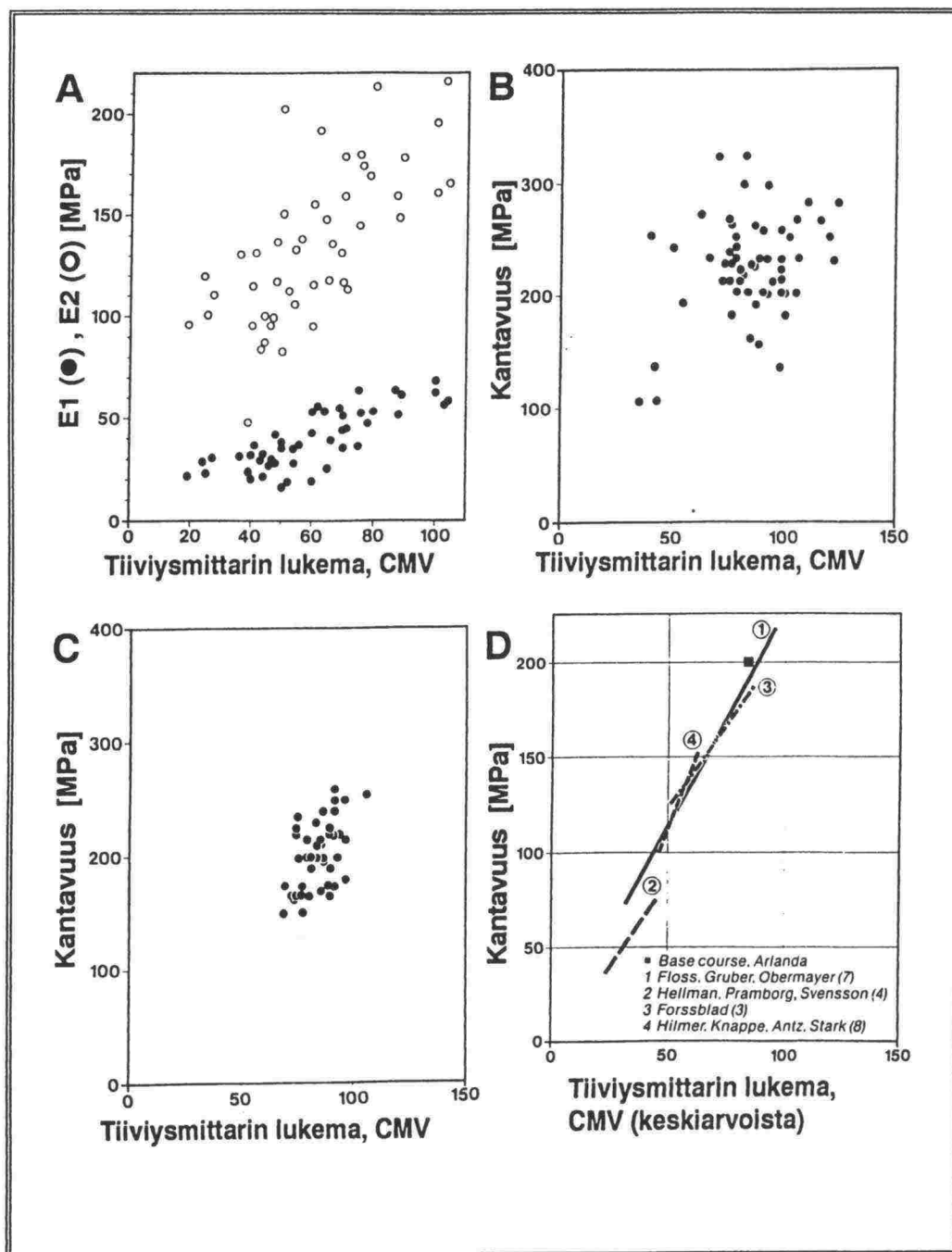
Kuva 45: Pienillä täryjyillä mitattuja kiihtyvyyssignaaleja. Valssi on kaikissa tapauksissa vapaasti tuettu. Ylin käyrä: Mittaus suoraan valssin ulkokehältä. Signaali on säröinen (ei sovi mittauksiin). Keskimmäinen käyrä: Mittaus kiinteästä paikasta valssin ja rungon välistä. Signaali on pahasti säröinen (ei sovi mittauksiin). Alin käyrä: tasapainoisen hyvin toimivan jyrän ominaisvärähtelyä (jyrä sopii mittauksiin).

CMV-mittauksiin vaikuttavat jyrän taajuus, jyräysnopeus, jyräys-suunta, reunaehdot (vapaat luiskat, rajoittavat seinämät), materiaalin raekokojakauma, vesipitoisuus tiivistettävän kerroksen paksuus, pohjaolosuhteet ja huokosveden ylipaine hienora-keisilla mailla /29/. CMV-arvo on pienempi lähellä luiskaa kuin keskellä tietä, mikä



johtuu puuttuvasta sivutuesta (käyttäytyy samoin kuin kantavuusmittaus). Kovalla alustalla valssi saattaa hyppiä epäsäännöllisesti, jolloin CMV-arvot häiriintyvät ja laskevat.

CMV-arvoja on verrattu moniin tavanomaisiin tiiviysmäärittäjiin. Hajonnat ovat olleet huomattavan suuria, mutta keskiarvot käyttäytyvät loogisesti (kuva 46).



Kuva 46: CMV-arvo ja kantavuus; **A** Levykuormituskokeen E1 ja E2-arvot, **B** pudotuspainolaitteella mitattu kantavuus jakavan kerroksen päältä, **C** pudotuspainolaitteella mitattu kantavuus kantavan kerroksen päältä ja **D** eri tutkimuksilla saadut riippuvuudet.

#### 4.4.3. Tavaramerkkejä

##### Compactometer

Voidaan liittää periaatteessa kaikkiin täryttäviin jyriin. Toistaiseksi Dynapac, Hamm ja Vibromax käyttävät tätä. Laitteella mitataan dynaamisia kantavuuksia 25-50 kertaa sekunnissa. Mittaussyvyys on 150-200 cm viivakuormalla 30 kN/m. Alla olevien heikkojen kerrosten vaikutus hankaloittaa tiiviyden arviointia.

##### Oscillometer

Oscillometeriä käytetään vain oskilloivissa jyryissä, joita valmistaa Hamm. Mittariin liittyy valssin heilahdustaajuuden ja ajonopeuden osoitus. Mittaussyvyys on n. 40 cm viivakuormalla 30 kN/m. Pinnan ollessa liukas laitteen antama arvo on liian pieni tai nolla.

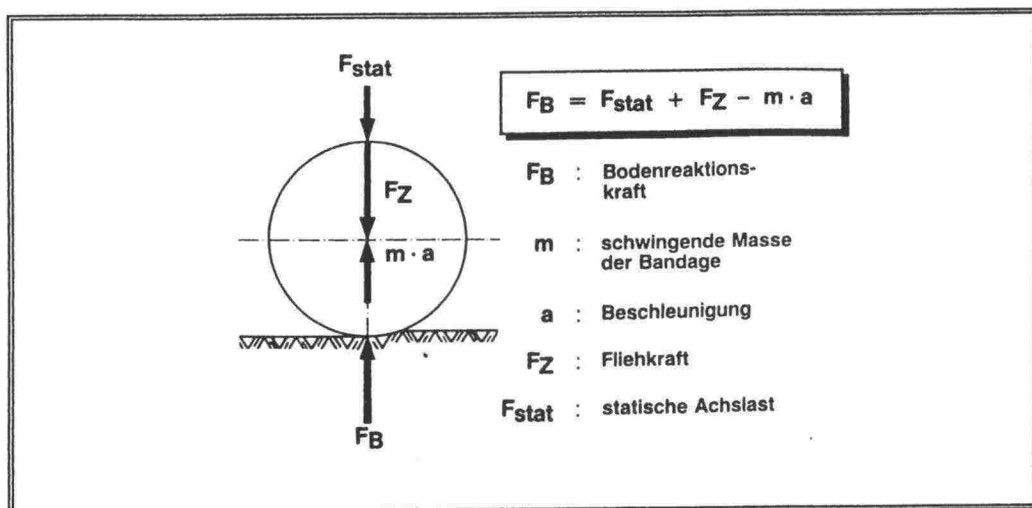
##### Compatronic

Casen malli vuodelta 1988. Sisältää kiihtyvyyssanturin kuten Terrameter. Tiiveysarvo, joka tulostetaan, ns.  $\lambda$ , saadaan näyttöön reaaliaikaisena tai kaistan keskiarvona.

##### Terrameter

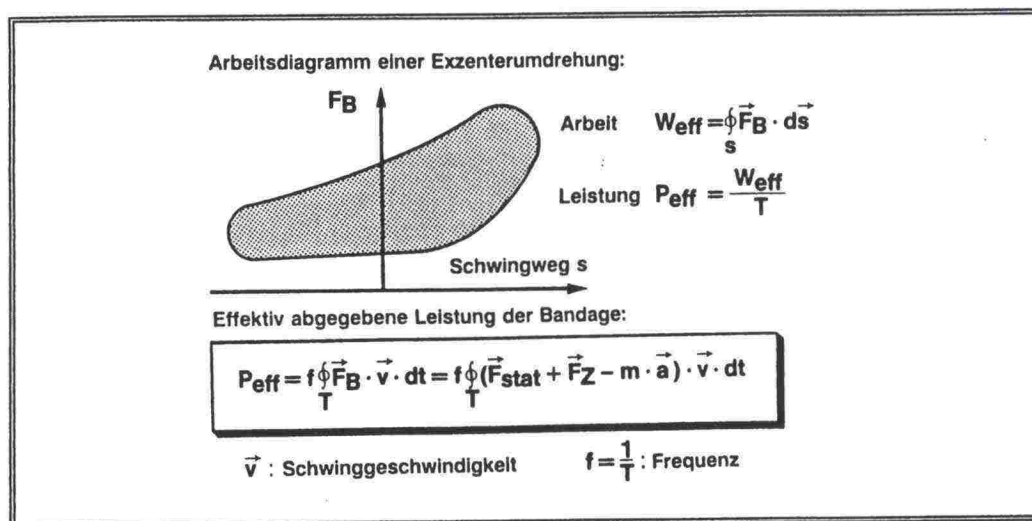
Terrameteriä käytetään vain Bomagin täryjyryissä ja sen toimintaperiaate on erilainen kuin Compactometerissä ja Oscillometerissä, jotka perustuvat lähinnä kimmoisuuden mittaamiseen. Terrameterin toiminta-ajatus johdetaan tiivistystyön kautta:

Tiivistettäessä siirretään energiaa maahan. Maa imee osan energiasta ja osa palautuu takaisin valssille. Heijastussuhde riippuu maan saavuttamasta tiiveystilasta. Maahan siirtynyt tehollinen energia jaettuna valssin epäkeskon pyörähdysajalla on yhtä kuin syötetty teho epäkeskon tekemää kierrosta kohti. Valsiin vaikuttavat voimat voidaan määrittää *kuvan 47* yhtälöstä.



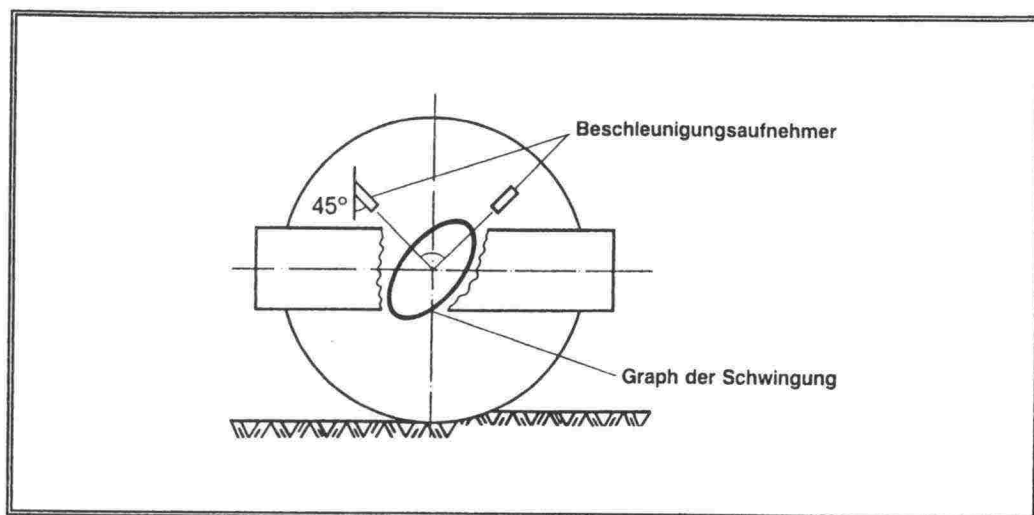
Kuva 47: Tärvalssin pystyvoimien tasapaino

Yhtälöstä nähdään, että maan reaktiovoima ( $F_B$ ) riippuu valssin kiihtyvyysoimista ( $m \cdot a$ ), epäkeskon keskipakovoimasta ( $F_z$ ) ja staattisesta kuormasta ( $F_{\text{stat}}$ ). Tehokas luovutettu työ voidaan laskea työkaaviosta (kuva 48).


 Kuva 48: Valssin luovuttama teho ( $P_{\text{eff}}$ ) epäkeskon pyörähdyksen aikana,  $v$  = pyörimisnopeus ja  $f$  = frekvenssi.

Menetelmä poikkeaa muista dynaamisista mittausjärjestelmistä kiihtyvyyssantureiden lukumäärän, sijoittelun (kaksi anturia 45 asteen kulmassa, kuva 49), laskentamenetelmän ja tulostuksen suhteen. Laitteistoon kuuluu kaksi kiihtyvyyssilmäistä, laskentayksikkö, nopeusilmaisim, suuntailmaisim, ohjauskeskus ja piirturin sisältävä mittarinäyttö. Kiihtyvyysslukema talletetaan jokaiselta epäkeskon kierrokselta. Muihin mahtuu 360 s mittauksia, mikä 3 km/h nopeudella on 300 m (tilanne vuonna 1988).





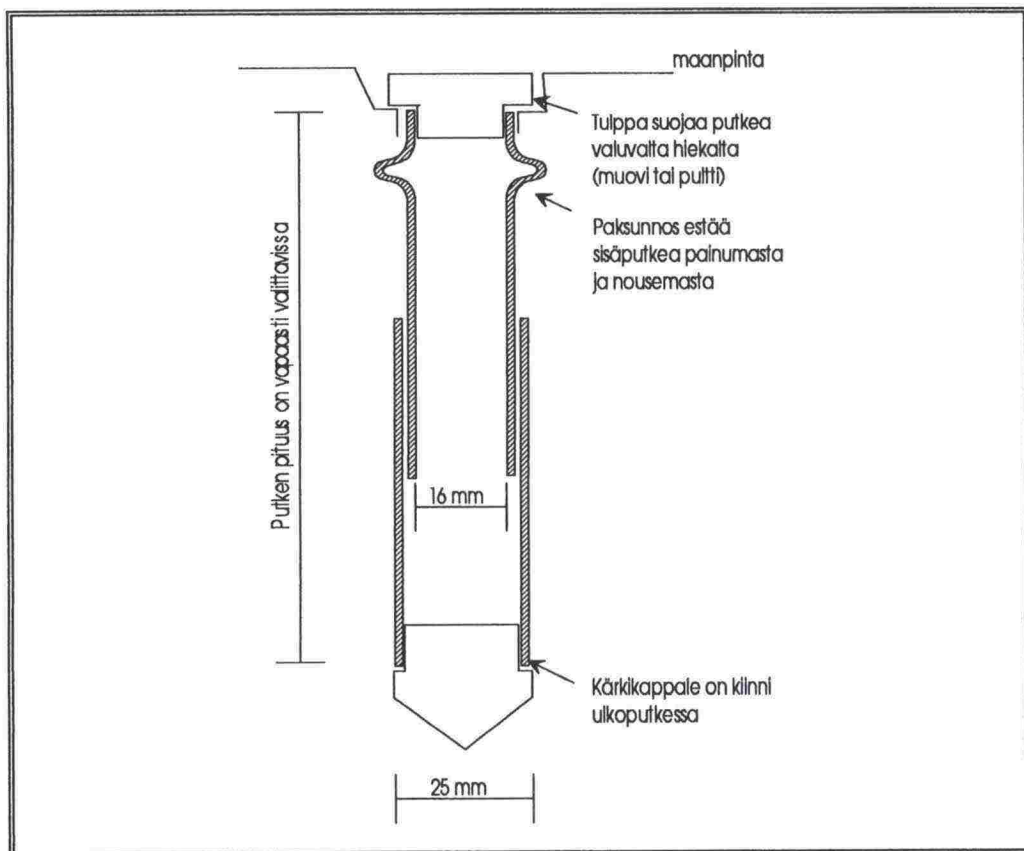
Kuva 49: Kiihtyvyyssilmäinten sijoitus, Terrameter

Tulos, omega-arvo, vaihtelee nolasta 1000:een. Tulostuksessa ilmoitetaan omega-arvojen lisäksi keskimääräinen frekvenssi ja ajonopeus (jotka laitteisto pitää vakiona, Bomag).

Tehtaan tutkimusosaston mukaan maan tiiviyden ja kantavuuden kasvaessa valssin kiihtyvyys kasvaa ja samalla omega-arvo nousee. Huonosti kantavilla pohjilla  $\Omega$  korreloi hyvin kuivatiheyden sekä kantavuuden kanssa. Suuri vesipitoisuus alentaa voimakkaasti  $\Omega$ :n maksimiarvoa kantavilla pohjilla. Koska nopeus vaikuttaa tehokkaaseen työmäärään, se on mittauksessa pidettävä tasaisena.

#### 4.5. Mittausputki

Troxler-mittauksissa käytetyt putket valmistettiin kahdesta sisäkkäin sopivasta muoviputkesta ("sähköputki"). Kun mitattava kerros painuu jyrättäessä kokoon, putki pysyy ehjänä ja siitä voidaan mitata monta kertaa peräkkäin. Mittauskohta pysyy koko ajan samana eikä kerrosta tarvitse asennuksen jälkeen häiritä (kuva 50).



Kuva 50: Poikkileikkaus mittausputkesta

Putki asennetaan alapäästään noin 5 cm alimman mittauskohdan alapuolelle joko kaivamalla tai lyömällä putken sisään sopivaa asennustankoa. Ennen putken asentamista kannattaa lyödä Troxlerin lyöntitangolla reikä varmistaen, että aiottu kohdalla ei ole liian suurta kiveä. Ennen ensimmäistä mittausta mittarin alusta tasaan hyvin ohuella kerroksella tasaushiekkaa, joka mieluummin on samaa, kuin tutkittava materiaali. Kosteuslukemaan vaikuttaa voimakkaasti juuri mittarin alla oleva kerros.

Kärkikappale valmistetaan sorvaamalla muovitangosta ja se kiinnitetään niin, että se ei lyötäessä irtoa. Putken yläpää suojataan tulpalla, joka putkea leveämpänä estää kiviainesta valumasta putkeen. Jyrättäessä on katsottava, ettei putken päällä ole kiviä. Silloin nimittäin putken suu painuu syvemmälle ja kiviainesta valuu putkeen kun tulppa poistetaan. Putken pohjalla on kylläkin tilaa, mutta jokin rae saattaa kiilautua mittaussondin ja putken väliin.

Asennusvaiheessa tulee huolehtia siitä, että putket pysyvät suorassa. Jyräys kannattaa tehdä vuorotellen molempiin suuntiin. Putkia ei pidä asentaa kovin lähelle

kaistan reunaa, missä sivusuuntaista tukea ei ole riittävästi (putken alapää liukuu ulospäin). Pieni kulman muutos voidaan korjata hieromalla Troxler-laitetta alustallaan kunnes se ei keinu.

Hankaluutena on työturvallisuusmielessä mittaussondin asettaminen putkeen, sillä helpoimmin se käy työntämällä ensin tankoa ulos laitteesta ja sitten nostamalla laite putken päälle. Paikan merkitseminen hiertolevyllä ei kuitenkaan tuottane vaikeuksia.

Putken ideoinnista ja kehittelystä on vastannut Kari Talsta (Mudex Oy, Kempele, p. 949-681114).



---

**KIRJALLISUUSLUETTELO**

- /1/ Anttila, L., Belt, J.: Kalliomurskeen käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa. Esiselvitys. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 26/1992. Oulu 1992.
- /2/ Anttila, L., Ehrola, E.: Uusia menetelmiä tierakenteen tiivistarkkailussa. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion raportteja n:o 20. Oulu 1990.
- /3/ Asp, K.: Vägmaterialdagar. Rapportsammanställning av föredrag vid vägmaterialdagarna i Linköping 1987-11-04--05. VTI meddelande 559. Linköping 1988. ISSN 0347-6049.
- /4/ Brink, W. :Compaction equipment performance - A field investigation. DPVT-95. 1989 Pretoria South Africa. ISBN: 0-7988-4866-9.
- /5/ Compaction and Paving. Theory and practice. Dynapac publication no. HC 1111-2 Eng. Sweden 1989.
- /6/ Gerresheim, J.P.: Erfahrungen mit Compatronic auf Erdbauschichten sowie weitere Compatronic Ausbaustufen. Roads and traffic 2000. International Road and traffic Conference. Berlin 6-9 September 1988. Vol 2/2 Proceedings. Road Construction and Maintenance. p 209-212. Köln 1988.
- /7/ Ferris, A. J. : Developments in compaction control systems. Highw Transp v 32 n 7 Jul 1985 p 2-5. ISSN: 0265-6868.
- /8/ Floss, R; Gruber, N.; Obermayer, J.: A dynamical test method for continous compaction control. Proceedings of the 8th European conference on soil mechanics and Foundation engineering: Improving of ground. Volume 1: in situ testing, soil grouting, deep compaction, laboratory testing. P 25-30. Helsinki 23 May 1983-26 May 1983. Rotterdam. ISBN 90-6191-241-5.
- /9/ Forssblad, L.:Vibratory soil and rock fill compaction. Dynapac Maskin AB, Solna, Sweden. 1981.
- /10/ Höbeda, P.: Glimmer i vägmateriel. Inverkan på egenskaper och analysmetoder för glimmerhalt. VTI meddelande 527. Linköping 1987. ISSN 0347-6049.
- /11/ Häkkinen, K.: Tiivistyskurssi. Maarakenteiden tiivistäminen. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 25/1991. Tampere 1991.
- /12/ Höbeda, P.: "Idealgrus till slitlager". En sammanställning av äldre svenska erfarenheter. VTI meddelande 77. Linköping 1978. ISSN 0347-6049.

- 
- /13/ Jordpackning inför 90-talet. En handledning. Vägverket, Bygg- och driftproduktion. Publ. 1990:40. Sverige 1990.
- /14/ Juvankoski, M., Kivikoski, H., Lindroos, P.: Maarakenteiden laadunvalvontamenetelmät. Menetelmäkuvaukset. VTT/Geo. Espoo 1990.
- /15/ Kam, W.H: Kombi-Walzen: Entwicklung - Einsatz - Grenzen. Roads and traffic 2000. International Road and traffic Conference. Berlin 6-9 September 1988. Vol 2/2 Proceedings. Road Construction and Maintenance. p 209-212. Köln 1988.
- /16/ Kanerva, H.: Troxler 3411-B:n soveltuvuus tierakenteen tiivistarkkailuun. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1985.
- /17/ Laadunvalvontaohjeet. Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Tielaitos Tieh/geo. Tiel 732816. ISBN 951-47-2714-2. Helsinki 1990.
- /18/ Lindh, E. : Packning av jordmaterial. Fältförsök med metoder för resultatkontroll vid Hörby 1985. VTI Meddelande 550. Lindköping 1988. ISSN 0347-6049.
- /19/ Lindh, E. : Packning av jordmaterial. Fältförsök med metoder för resultatkontroll vid Falköping 1986. VTI Meddelande 551. Lindköping 1988. ISSN 0347-6049.
- /20/ Lindh, E. : Packning av jordmaterial. Fältförsök med metoder för resultatkontroll vid Norsholm 1986. VTI Meddelande 552. Lindköping 1988. ISSN 0347-6049.
- /21/ Lindh, E. : Packning av jordmaterial. Prov med metoder för resultatkontroll i VTIs provbassäng i Lindköping 1985. VTI Meddelande 549. Lindköping 1988. ISSN 0347-6049.
- /22/ Mesdary, MS :Compaction of subgrade soils in Kuwait. Pre-conference proceedings 3rd IRF Middle East regional meeting: Towards better road performance, Riyadh, Saudi Arabia, 13-18 January 1988. Volume 3: Road construction: Methods and quality control, upgrading low quality materials, low volume roads. 1988 Washington DC.
- /23/ Nguen, H.: Design and testing of an innovative machine for the spreading, precompacting and compacting of road materials. Roads and traffic 2000. International Road and traffic Conference. Berlin 6-9 September 1988. Vol 2/2 Proceedings. Road Construction and Maintenance. p 95-99. Köln 1988.
- /24/ O'Reilly, MP : Analyses of the performance of dead-weight rollers compacting soil. TRRL Research report. RR 300. UK 1991. ISSN: 0266-5247.
- /25/ O'Reilly, MP : Analyses of the performance of vibrating and impacting compaction plant. TRRL Research report. RR 316. UK 1991. ISSN: 0266-5247.

- 
- /26/ Poulsen, J.: Komprimeringskontrol med Isotopstyr Afprøvning af Isotopoverfladesonde. Statens Vejlaboratorium. Inre notater 145. 1983.
- /27/ Schmertmann, J. : CPT/DMT QC at a power plant. Use of in situ tests in geotechnical engineering. Proceedings of In Situ '86 23 Jun 1986-25 Jun 1986. Geotechnical Special Publ n 6, p 985-1001. New York. ISBN: 0-87262-541-9.
- /28/ Schmidt, N.O. : Methods for achieving and measuring soil compaction. Build stand v 55 n 2 Mar-Apr 1986 p 5-9. ISSN: 0270-1197.
- /29/ Schwab, E.F. : Compaction control with the compactometer. Proceedings of the 8th European conference on soil mechanics and Foundation engineering: Improving of ground. Volume 1: in situ testing, soil grouting, deep compaction, laboratory testing. P 73-82. Helsinki 23 May 1983-26 May 1983. Rotterdam. ISBN 90-6191-241-5.
- /30/ Spann, S.W. : Available compaction equipment. Earthmoving and Heavy Equipment. Proceedings of the conference. ASCE. New York. p. 10-13. ISBN: 0-87262-548-6.
- /31/ Stokoe, K. H., Nazarian, S.: Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves. Proceedings of the 8th European conference on soil mechanics and Foundation engineering: Improving of ground. Volume 1: in situ testing, soil grouting, deep compaction, laboratory testing. P 91-94. Helsinki 23 May 1983-26 May 1983. Rotterdam. ISBN 90-6191-241-5.
- /32/ Suomen Maarakentäjien Keskusliitto: Maarakennuskoneet ja ajoneuvonosturit 1992. ISBN 952-9697-01-5.
- /33/ Tewari, Naren : Modern trends in compaction and compacting equipments. Indian Highw v 14 n 10 Oct 1986 p 5-12. New Delhi, India.
- /34/ Touran, A. : Expert system for compactor selection. American society of civil engineers. Journal of transportation engineering vol 116 no. 3 May 1990 pp 338-348. New York.
- /35/ Täryjyryksen laadunvarmistus. Tie- ja vesirakennushallitus. Tuotannon kehittämispalvelut. TVH 733898. Helsinki 1989. ISBN 951-47-1642-6.
- /36/ Vainio, T.: Kalliomurskeen hienonemisen ja hienoaineksen laadun tutkiminen myllykokeella. Tielaitos, Vaasan tiepiiri. Lokakuu 1990.
- /37/ Vekhuilen, B. : Uniform density aided by vibratory compaction. Scranton Gillette Communications Inc. Roads & Bridges vol. 27 no. 5 May 1989, pp 51-52. Illinois.



- /38/ Waidelich, W.C. : Earthwork construction. Transportation research board. State-of-the-art Report n 8 1990 pp 25-48. Washington DC.
- /39/ Whetten, NL : Densification of gravelly sand fill using intensive surface compaction. Journal of geotechnical engineering. Volume 117, number 7. pp 1089-94. 1991 New York.
- /40/ Winter, M.G. : The measurement of reinstatement backfill quality by a non-intrusive method. Field testing in engineering geology. Proceedings of the twenty-fourth annual conference of the engineering group of the geological society, Sunderland Polytechnic, September 4-8 1988 pp 275-285. UK 1990. 0-903317-51-6.

## LIITELUETTELO

Liite 1 Mineralogiset selvitykset.

Liite 2 Ominaispinta-ala, röntgendiffraktio- ja sedigraphmääritykset.

Liite 3 Tiivistymis- ja hienonemistekijöiden korrelaatiomatriisi.



Jouko Belt  
Oulun yliopisto  
Tie- ja liikennetekniikan laboratorio

Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratoriossa suoritettiin kalliomurskeiden tiivistämis -tutkimukseen liittyen laboratoriotutkimuksia (ominaispinta-ala, sedigraph ja röntgendiffraktio). Määritykset suoritettiin näytteiden hienoaineksista (<0.074 mm), jotka eroteltiin laboratorioomme toimitetuista näytteistä seulomalla. Lisäksi mineraalikoostumus määritettiin kahdesta alkuperäisestä näytteestä (> 6mm).

1. Ominaispinta-ala mittaukset suoritettiin typpiadsorptiomenetelmällä Flow-Sorb 2300 laitteella, tulokset on esitetty oheisessa taulukossa.

NÄYTE (<0,074 mm)	OMINAISPINTA-ALA m <sup>2</sup> /kg
NURMO 0 YLITYSTÄ	1830
NURMO 0 YLITYSTÄ RINNAKK.	1830
NURMO 24 YLITYSTÄ	2130
NURMO 24 YLITYSTÄ RINNAKK.	2310
SIEVI 0 YLITYSTÄ	3190
SIEVI 0 YLITYSTÄ RINNAKK.	3080
SIEVI 24 YLITYSTÄ	2940
SIEVI 24 YLITYSTÄ RINNAKK.	3090

2. Sedigraph-rakeisuudet on esitetty liitteenä, tiheytenä käytettiin arvoa 2,75 g/cm<sup>3</sup>.



3. Mineraalikoostumukset määritettiin Philips röntgendiffraktometrillä kuulamyllyllä jauhetuista näytteistä, tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa.

NÄYTE	KV %	PLG %	KMS %	BT %	SV %	KLO %
NURMO ALKUPER.	27	55	–	18	–	–
NURMO 0 YLIT	28	43	–	29	–	–
NURMO 0 YLIT RINN	31	44	–	25	–	–
NURMO 24 YLIT	23	40	–	37	–	–
NURMO 24 YLIT RINN	20	49	–	31	–	–
SIEVI ALKUPER.	23	49	–	11	14	3
SIEVI 0 YLIT	39	38	–	4	15	4
SIEVI 0 YLIT RINN	29	45	–	5	18	3
SIEVI 24 YLIT	26	41	–	6	22	5
SIEVI 24 YLIT RINN	24	41	–	4	26	5

KV = kvartsi  
PLG = plagioklaasi  
KMS = kalimaasälpä

BT = biotiitti  
SV = sarvivälke  
KLO = kloriitti

Esitetyistä taulukoista voidaan havaita, että näytteessä Nurmo kiilteen määrä kasvaa ylityskertojen lisääntyessä. Kiilteen rikastuminen hienoainekseen havaitaan myös ominaispinta-alan kasvuna. Näytteessä Sievi sarvivälkkeen lisääntyminen ei vaikuta ominaispinta-alaan.

Tampereella 23.9.1992

Pertti Nieminen, dosentti



SAMPLE IDENTIFICATION

Nurmo O-yhtystä

Density 2.75 g/cc

LIQUID

Density

g/cc

Viscosity

cp

Preparation

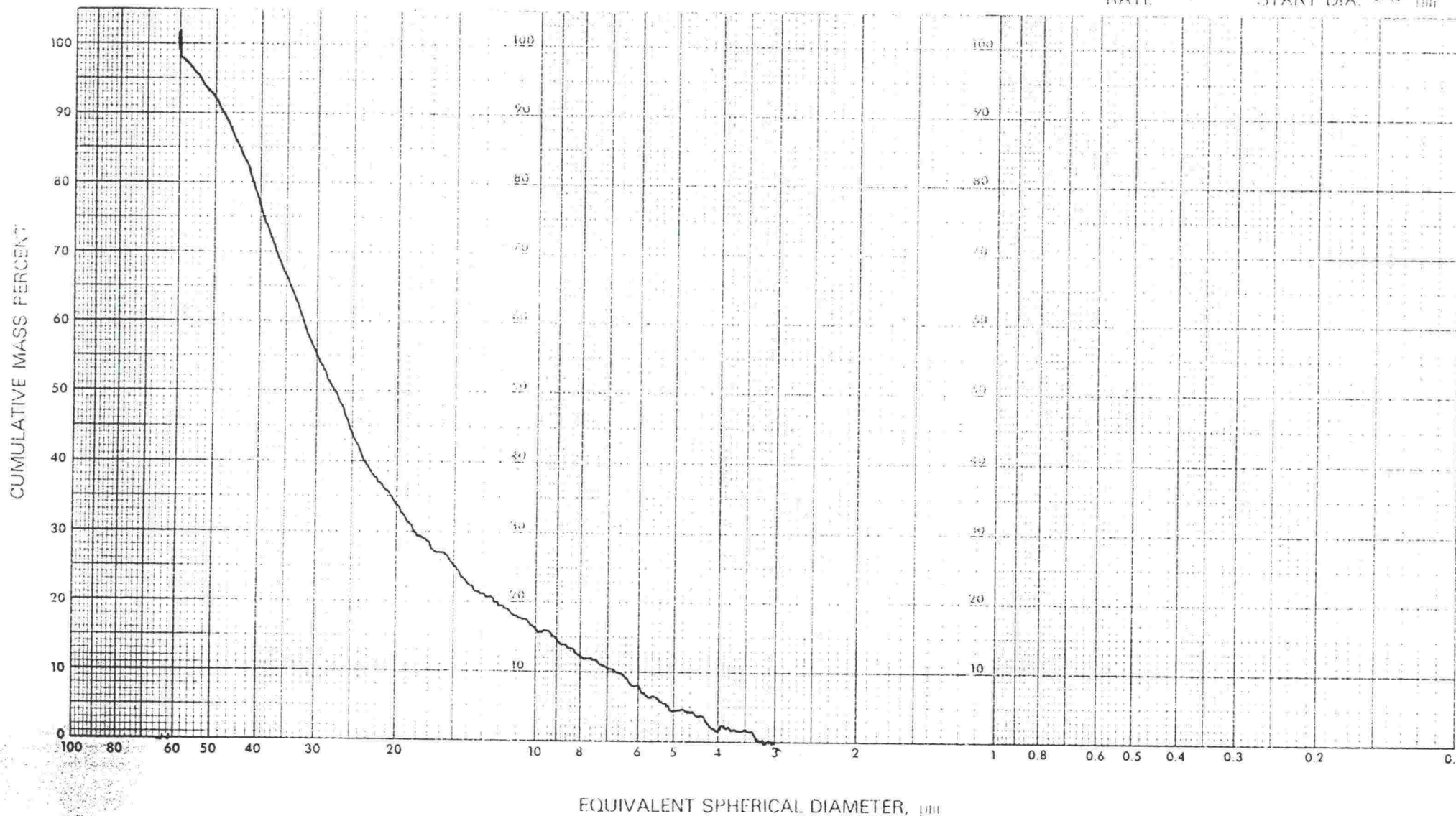
19 näytettä 25 ml:ssa 0.05% Na-profosfaattia

DATE 21.9.1992

BY HKV

TEMPERATURE 33 °C

RATE 877 START DIA. 60 μm



micromeritics  
instrument corporation

LITE 1

SAMPLE IDENTIFICATION

Nurmo 24-yhtystä<sup>®</sup> paketti B6

DATE 21.9.72

Density 1.75 g/cc LIQUID

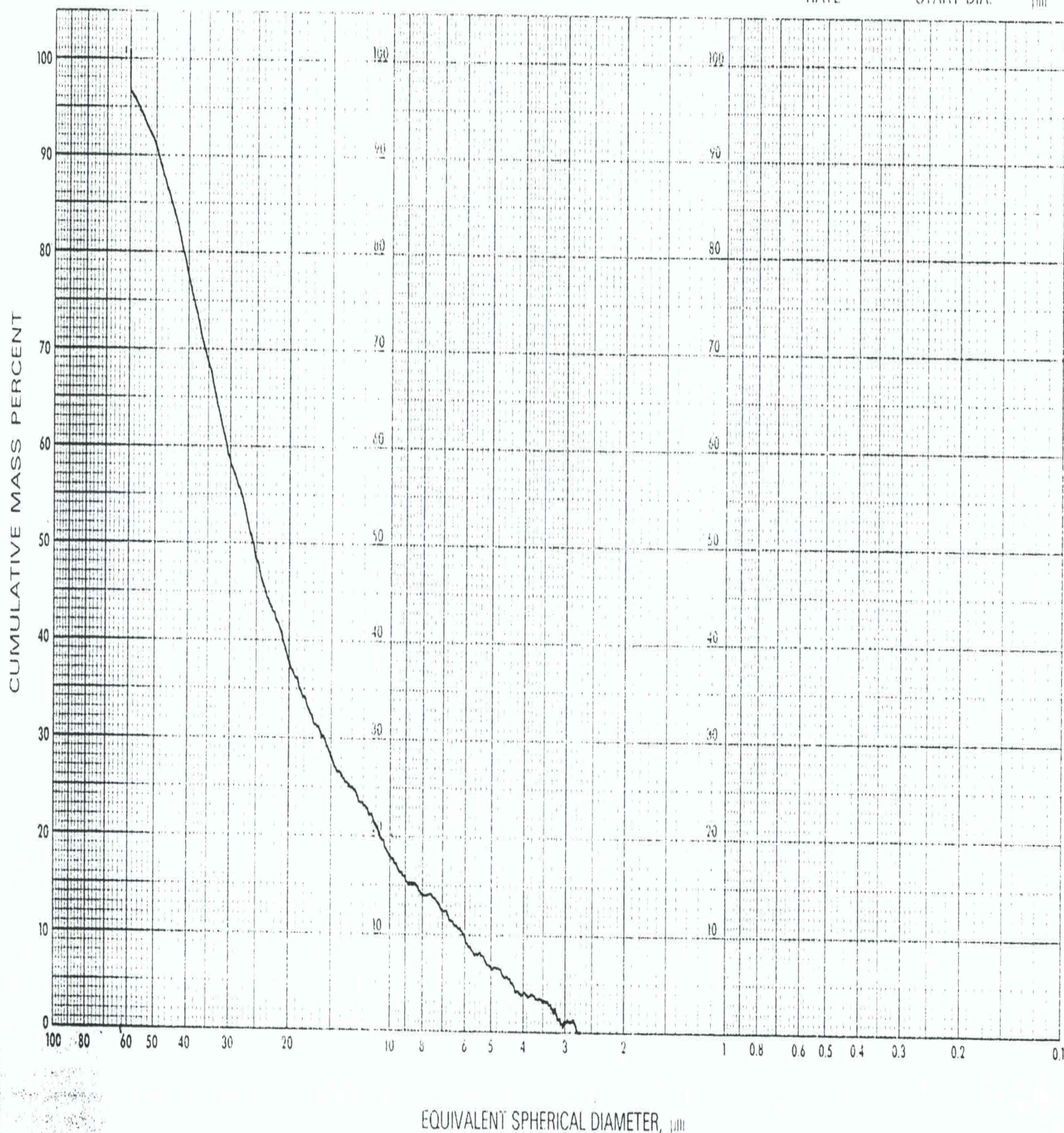
Density g/cc Viscosity cp

BY JHV

Preparation 1g näytettä 25 ml:ssa 0.05% Na-pyrosulfaattia

TEMPERATURE 33 °C

RATE 877 START DIA. 60  $\mu$ m



LITE 1



micromeritics  
instrument corporation



SAMPLE IDENTIFICATION *Nurmo O-yhtystä rinnakkainen*

Density *2.75* g/cc LIQUID

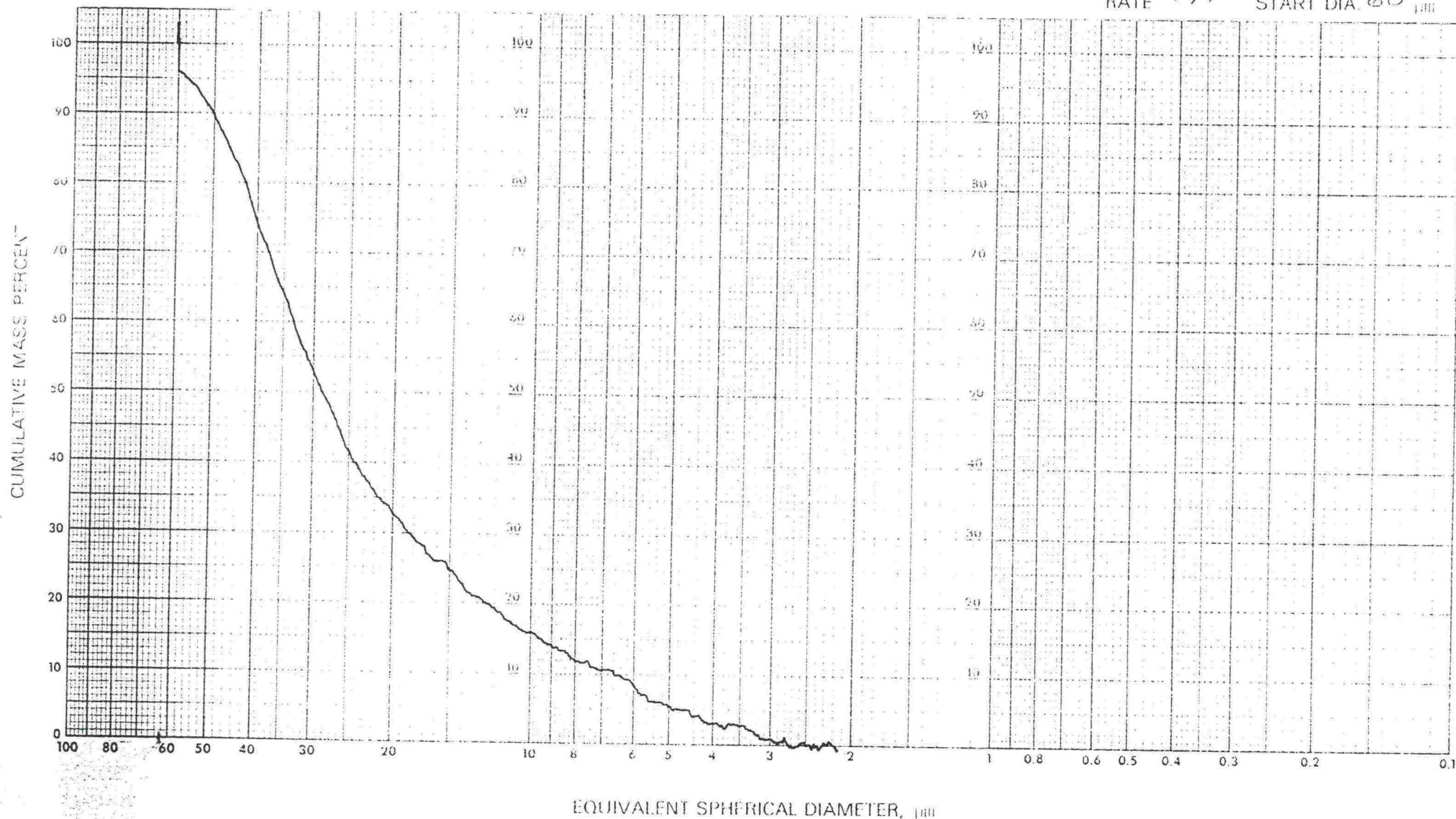
Preparation *19 rdytetä 25 ml:ssa 0,05% Na-pyrosulfaatti*

DATE *24.2.1992*

BY *PKV*

TEMPERATURE *33* °C

RATE *877* START DIA. *60*  $\mu$ m



**micromeritics**  
instrument corporation

LITE 1



SAMPLE IDENTIFICATION

Murmo 24 ylitösti rinnakkainen pöytä B6

DATE 20. 11. 72

Density 2.75 g/cc LIQUID

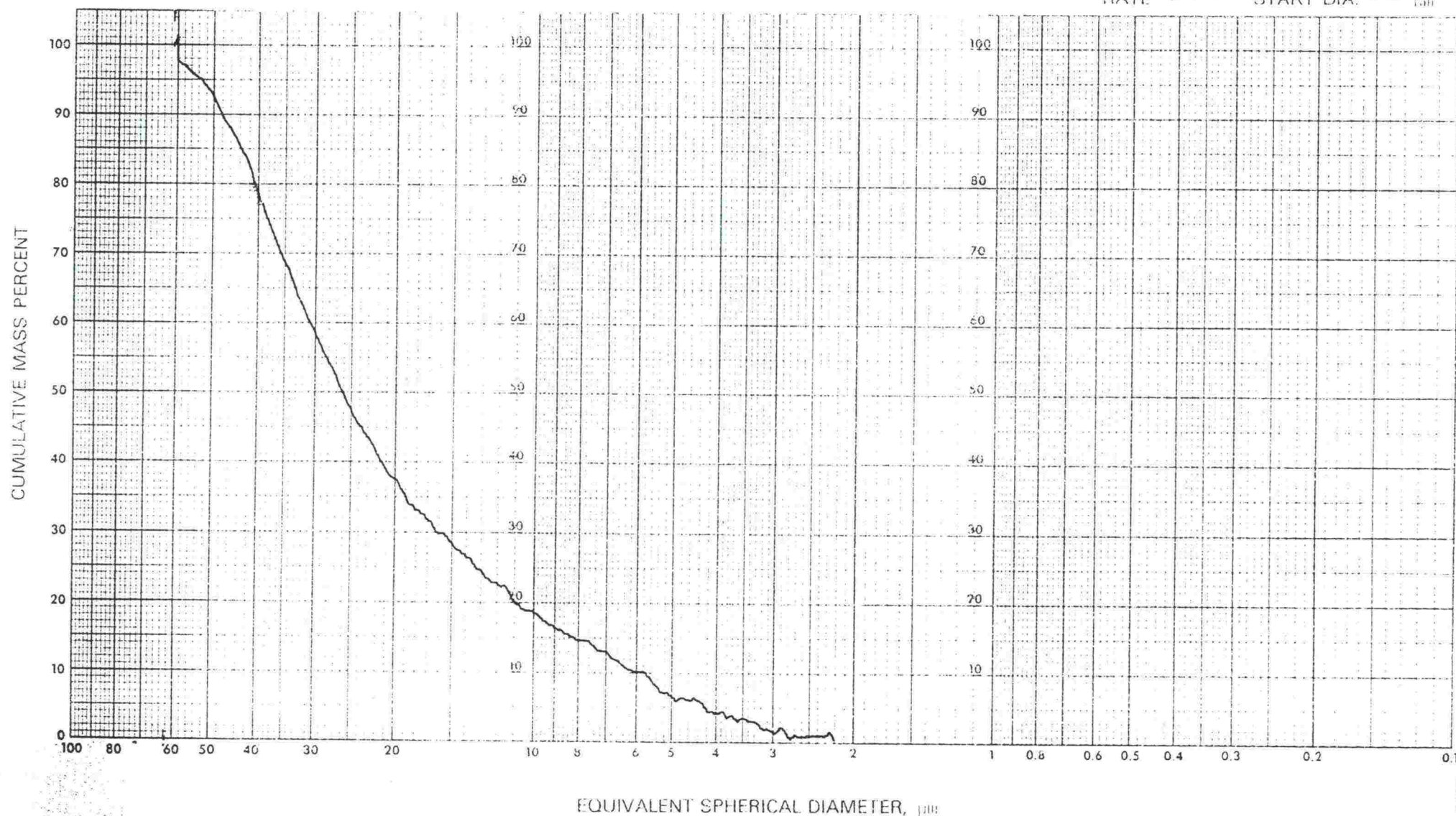
Density g/cc Viscosity cp

BY HV

Preparation 1g naphthal 25 ml:ben 0.05% Na-pyrophosphate

TEMPERATURE 53 °C

RATE 877 START DIA. 60 100



**micromeritics**  
instrument corporation

LITE 1

SAMPLE IDENTIFICATION

Sievi 0-yliä rinnakk.

Density 2.75 g/cc

LIQUID

Density

g/cc

Viscosity

cp

DATE 22.7.72

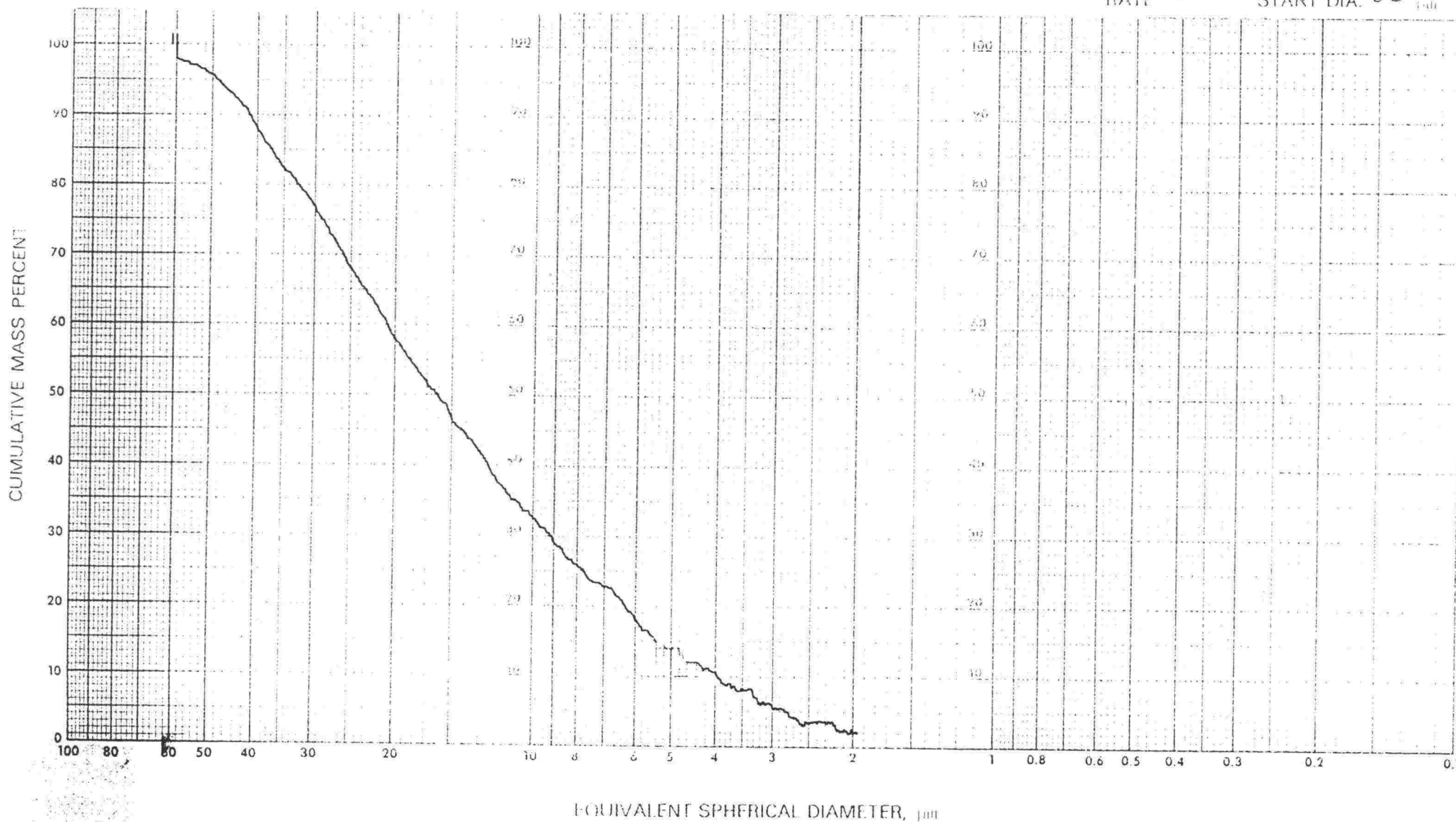
BY PKV

Preparation

1) näytettä 25 ml:aa 0,6% Na-pyroteksti.

TEMPERATURE 34 °C

RATE 871 START DIA. 60 µm



micromeritics  
instrument corporation

LITE 1



SAMPLE IDENTIFICATION

Sevi 24-ylit. rinnaakkainen

DATE

21.2.1992

Density

2.75

g/cc

LIQUID

Density

g/cc

Viscosity

cp

BY

PKV

Preparation

19 näytettä 25 ml:ssa 0,05% Na-pysof.

TEMPERATURE

33 °C

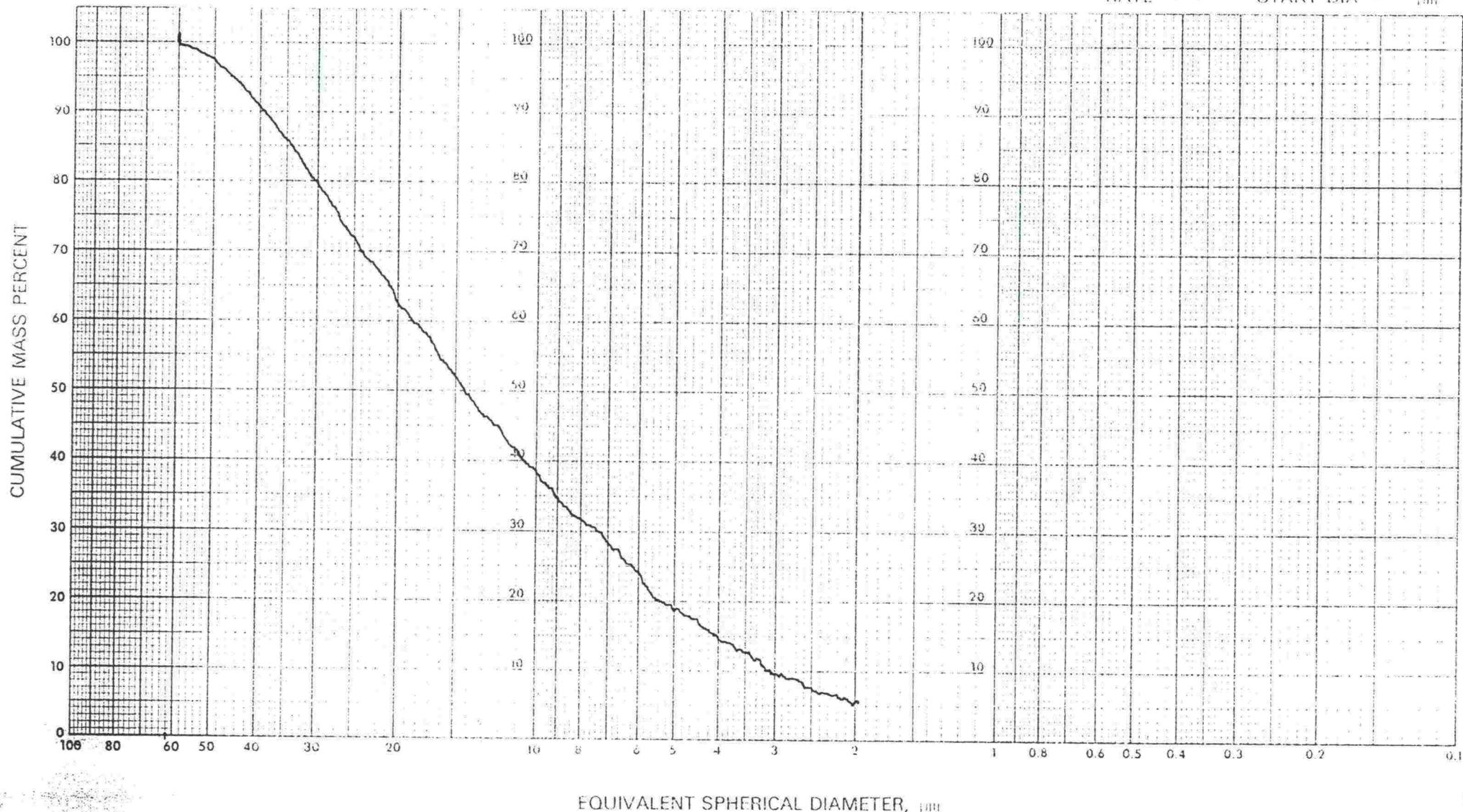
RATE

877

START DIA

60

µm



**micromeritics**  
instrument corporation

LITE 1



SAMPLE IDENTIFICATION

Sievi 0-ylitystä

DATE

21.7.1992

Density

2.75

g/cc

LIQUID

Density

g/cc

Viscosity

cp

BY

AKV

TEMPERATURE

33

°C

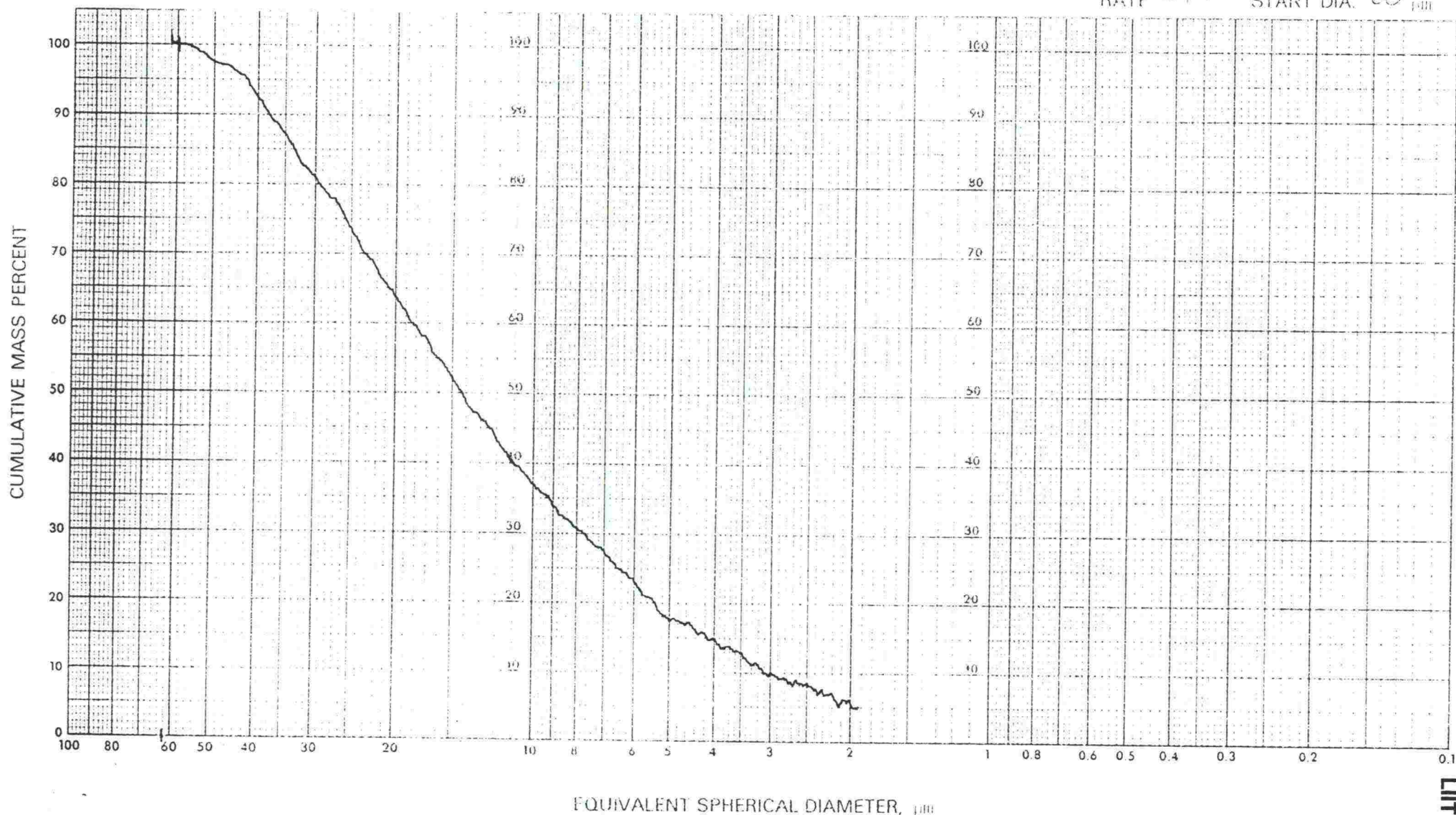
RATE

847

START DIA.

60

µm



LITE 1

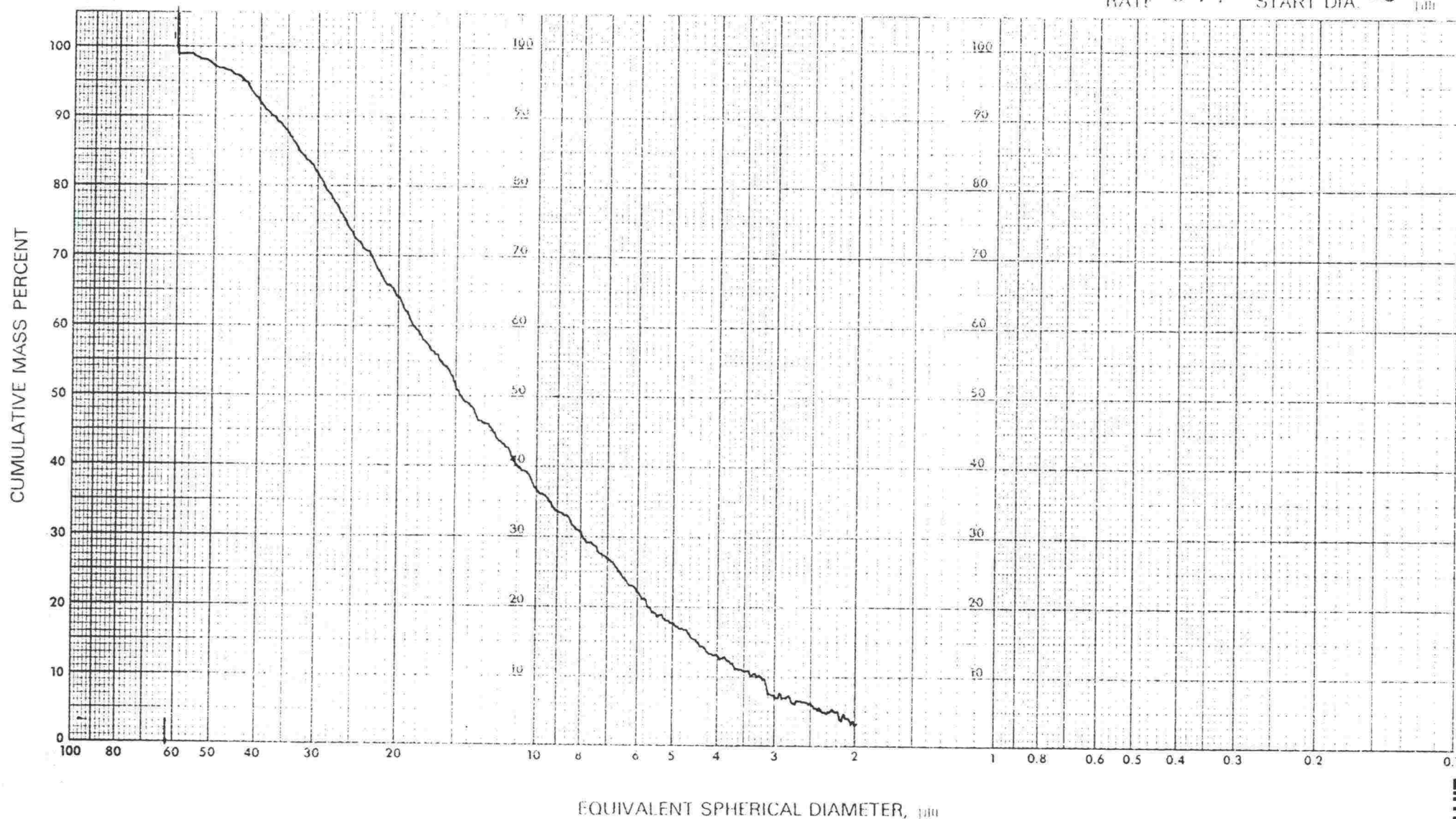


**micromeritics**  
instrumental corporation

SAMPLE IDENTIFICATION

Sievi 24-yhtystön  
 Density 2.75 g/cc LIQUID Density g/cc Viscosity cp  
 Preparation 19 näytettä 25 ml:ona 0,05% Na-pyrafosf.

DATE 21.7.1992  
 BY PKV  
 TEMPERATURE 33 °C  
 RATE 877 START DIA. 60 µm



LITE 1





Oulun Yliopisto

Tielaboratorio

Kivilajimääritykset kiviainesnäytteistä

Näytteet: Sievi, Nurmo, Alakylä ja Kempele

**SIEVI : kivilaji INTERMEDIÄÄRINEN VULKANIITTI**  
mineraalikoostumus määritetty Tampereen TKK:ssa

**NURMO: kivilaji GRAUVAKKA** (sisältää myös Kiilleliusketta)  
mineraalikoostumus määritetty Tampereen TKK:ssa

**ALAKYLÄ, Haukipudas: kivilaji GRAUVAKKA**

mineraalikoostumus: Kvartsi	40 %
Biotiitti	25 %
Plagioklaasi	15 %
Muskoviitti	15 %

lisäksi: Kloriitti, Opaakki, Serisiitti < 5 %

**KEMPELE, Linnakangas: kivilaji GRANIITTI**

mineraalikoostumus: Kalimaasälpä	30-50 %
Kvartsi	20-40 %
Plagioklaasi	15-30 %
Biotiitti	5-15 %

lisäksi: Kloriitti, Sarvivälke, Opaakki, Serisiitti, Apatiitti < 5 %

Kello 27.10.1992

FL Hannu Vehkaperä  
rakennusgeologi  
**GEOPUDAS OY**



**MINERALOGISET TUTKIMUKSET OULUN YLIOPISTON TIELABORATORION  
KIVIAINESNÄYTTEISTÄ**

Näyte: **ALAKYLÄ, Haukipudas**

**GRAUVAKKA**

mineraalikoostumus: kvartsi	40 %
biotitti	25 %
plagioklaasi	15 %
muskoviitti	15 %

lisäksi:                   kloriitti, opaakki, serisiitti < 5 %

Kvartsi: esiintyy vierasmuotoisina, sileäpintaisina 0,2– 1 mm:n suuruksina rakeina, muuttumaton

Biotitti: esiintyy pääosin omamuotoisina liistakkeina, raekoko 0,2–2 mm, muuttumistuloksena hieman serisiittiä ja kloriittia

Plagioklaasi: esiintyy osittain omamuotoisina, 0,2–1 mm:n suuruksina kiteinä, muuttumistuloksena hieman serisiittia

Muskoviitti: esiintyy biotiitin tavoin

**Rakenne**: suomuinen (lepidoklastinen), kohtalaisen selvästi suuntautunut, kiillemineraalit aiheuttavat suomuisen rakenteen, mineraalien kontaktipinnat valtaosin sileitä, mistä johtuen hienontuu kohtalaisen herkästi

**Rapautuneisuus**: kiviaines hyvin vähän muuttunutta

**Kivilajityyppi**: alkujaan mereen kerrostunutta kvartsi- ja kiillepitoista sedimenttiä, joka vuorijonopoimutuksessa kiteytynyt osittain uudelleen.

Kellossa 17.11.1992

FL Hannu Vehkaperä  
rakennusgeologi  
**GEOPUDAS OY**



Näyte: **KEMPELE, Linnakangas**

### GRANIITTI

mineraalikoostumus: kalimaasälpä 30–50 %  
kvartsi 20–40 %  
plagioklaasi 15–30 %  
biotitiitti 5–15 %

lisäksi: kloriitti, sarvivälke, opaakki, serisiitti, apatiitti < 5 %

Kalimaasälpä: esiintyy osittain omamuotoisina, sileäpintaisina, suurina kiteinä, reokoko 1–5 mm, muuttunut vähäisesti serisiitiksi

Kvartsi: pääosin vierasmuotoisina, sileäpintaina rakeina, reokoko 0,5–2 mm

Plagioklaasi: osittain omamuotoista, sileäpintaista, lievästi muuttunutta, reokoko 1–3 mm

Biotitiitti: esiintyy omamuotoisina liistakkeina, muuttunut hieman kloriitiksi, reokoko 0,5–2 mm

**Rakenne**: rakeinen (granulaarinen), mineraalien kontaktipinnat suoria ja sileitä, joten kiinnityspinnat löyhiä, mineraalit pääosin hauraita. Tästä johtuen kiviaines hienontuu herkästi

**Rapautuneisuus**: ei rapautunutta, ei rapautumisalttiita mineraaleja

**Kivilajityyppi**: magmakivi, joka kiteytynyt happamasta magmasta syvällä maankuoren alla

Kellossa 17.11.1992

FL Hannu Vehkaperä  
rakennusgeologi  
**GEOPUDAS OY**



Näyte: SIEVI

### INTERMEDIÄÄRINEN VULKANIITTI

Päämineraalit:	plagioklaasi	30–50 %
	kvartsi	20–30 %
	amfiboli	15–20 %
	epidootti	10–12 %

Lisämineraalit: biotiitti, kloriitti, opaakki, apatiitti

Plagioklaasi: esiintyy vierasmuotoisena, hienorakeisena massana, rakekoko < 0,5 mm

Kvartsi: kvartsirakeet särkyneet pieniksi rakeiksi, rakekoko < 0,5 mm

Amfiboli: esiintyy säteettäisesti, uudelleen kiteytyneinä rakeina, sitoen muita mineraaleja

**Rakenne**: ns. muurilaastirakenne, jossa mineraalit muodostavat tiiviin massan sitoen toisiaan tehokkaasti yhteen. Tästä johtuen kivi kestää hyvin iskevää ja jauhavaa kulutusta.

**Rapautuneisuus**: plagioklaasi muuttunut kohtalaisen runsaasti epidootiksi

**Kivilajityyppi**: kiteytynyt tulivuoren tuhkasta, jonka sekaan purkauksen on yhteydessä lentänyt isompia heitteitä

Kellossa 17.11.1992

FL Hannu Vehkaperä  
rakennusgeologi  
GEOPUDAS OY





Näyte: **NURMO**

**GRAUVAKKA** (sisältää myös kiilleliusketta)

Päämineraalit:	kvartsi	40 %
	plagioklaasi	30 %
	biotiiitti	20 %
	muskoviitti	5 %

Lisämineraalit: kloriitti, apatiitti, muskoviitti, opaakki

Kvartsi: esiintyy vierasmuotoisina, sileäpintaisina rakeina, raekoko 0,3–1 mm

Plagioklaasi: osittain omamuotoista, sileäpintaista, vähän serisiittyynyttä, raekoko 0,3–1 mm

Biotiitti: esiintyy omamuotoisina liistakkeina, muuttunut paikoin kloriitiksi, raekoko 0,5–2 mm

**Rakenne**: suomuinen (lepidoklastinen), kiillepinkat selvästi suuntautuneita ja aiheuttavat kiveen selviä lohkosuuntia. Rakeiden kontaktipinnat sileitä ja suoria, joten kivi hienontuu herkästi.

**Rapautuneisuus**: ei herkästi rapautuvia aineksia

**Kivilajityyppi**: alkujaan mereen kerrostunut kvartsi- ja kiillepitoinen hieno hiekkasedimentti. Vuorijonopöimöksessä kiteytynyt osittain uudelleen.

Kellossa 17.11.1992

FL Hannu Vehkaperä  
rakennusgeologi  
**GEOPUDAS OY**



## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 11/1993 "Vuorovaikutus tavaksi"; Palveleva tielaitos -projektin loppuraportti.  
TIEL 3200138
- 12/1993 Meluesteet ja puisen meluesteen malli. TIEL 3200139
- 13/1993 Hiekka- ja suolavarastot. TIEL 3200140
- 14/1993 Tie kokemusmaailmana. TIEL 3200141
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa.  
TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1.  
TIEL 3200143
- 17/1993 Asfalttipäällysteiden suunnitteluperusteiden vertailu nastattoman ja  
nastallisen liikenteen välillä, kirjallisuustutkimus. TIEL 3200144
- 18/1993 Tiehankkeiden liikennetaloudellisen kannattavuuden toteutuminen.
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus; Mittaukset ja  
havainnot. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 21/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 22/1993 Liikenneväylän vaikutukset lähiympäristön yhdyskuntarakenteeseen;  
Väestö-, työpaikka- ja elinkeinorakenteen muutokset vt 3 Helsinki -  
Tampere -tien vaikutusalueella. TIEL 3200148
- 23/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Pohjanvahvistusmenetelmän valinta.  
TIEL 3200149
- 24/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Tiegeotekniikan yleiset suunnittelu-  
perusteet. TIEL 3200150
- 25/1993 Teknologien siirto, T<sup>2</sup> -keskuksen perustaminen. TIEL 3200151
- 26/1993 Pohjaveden suojausrakenteiden laadunvalvonta; Tutkimuksia ja  
suosituksia. TIEL 3200152
- 27/1993 Valaisinpylväiden perustaminen; Ympäristäytön laadun ja tiivistämis-  
tavan vaikutus pilariperustuksen siirtymiin. TIEL 3200153
- 28/1993 Nastallisen ja nastattoman liikenteen päällysteet, yhteenveto. TIEL 3200154
- 29/1993 Tieinvestointien toteutustapa viidessä Euroopan maassa. TIEL 3200155
- 30/1993 Pasilan virastokeskuksen työmatka- ja työliikennetutkimus. TIEL 3200156
- 31/1993 Savo-Karjalan tiepiirin murskaustoiminnan kehittäminen.
- 32/1993 Tiemerkintöjen näkyvyys; Paluuheijastavuustutkimus Lapin tiepiirissä.  
TIEL 3200157
- 33/1993 Tiesuolan pohjavesivaikutusten mallintaminen Joutsenonkankaalla.  
TIEL 3200158